

УДК 535.8

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ

**Белоусов Андрей Петрович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент каф. общей физики факультета радиотехники и электроники ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.  
E-mail: abelousov@ngs.ru

**Белоусов Петр Яковлевич,**

канд. техн. наук, доцент каф. оптических информационных технологий факультета физико-технического факультета ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: pyabelousov@ngs.ru

**Борыняк Леонид Александрович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. общей физики факультета радиотехники и электроники ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: borynyak-leonid@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью эффективного использования твердотельных акустооптических модуляторов в широком диапазоне технических устройств, таких как дефлекторы, устройства смещения частоты и развертки, делители оптических пучков, лазерные доплеровские анемометры и многих других.

**Цель работы:** изучение температурной динамики твердотельных акустооптических модуляторов бесконтактными оптическими методами. Обоснование использования коммутационных режимов работы акустооптических модуляторов в технических устройствах. Определение диапазона применимости и возможных погрешностей при эксплуатации.

**Методы исследования:** измерение сдвига фазы световой волны, обусловленного тепловым изменением оптической плотности и геометрических параметров рабочей области твердотельного акустооптического модулятора. Оценка интегрального изменения температуры в зависимости от времени и положения зондирующего пучка в звукопроводе. Реализуется двухлучевая схема интерферометра. Излучение гелий-неонового лазера с длиной волны  $\lambda=632,8$  нм мощностью 0,5 мВт разбивается на два пучка светоделительным кубиком. В один из пучков помещается акустооптический модулятор. Сдвиг фаз, вызванный изменением оптической плотности и геометрических параметров исследуемого объекта, фиксируется по смещению интерференционных полос. Методы анализа изображений, интерферометрии, фотометрии, акустооптики, материаловедения, когерентной оптики, лазерной физики.

**Результаты:** измерен сдвиг фазы световой волны, обусловленный изменением оптической плотности и толщины объекта. Проведена оценка интегрального изменения температуры в зависимости от времени и положения зондирующего пучка в звукопроводе твердотельного акустооптического модулятора. Определено время выхода устройства на стационарный режим. Результаты исследования показали, что максимальная величина погрешности измерения скорости потоков с низкой частотой следования светорассеивающих трассеров при использовании коммутационного режима работы твердотельного модулятора в лазерных доплеровских анемометрах будет равняться 0,5 %. Повышение точности может быть достигнуто путем применения корректирующих алгоритмов.

### **Ключевые слова:**

Твердотельные акустооптические модуляторы, интерферометрия, дифракция, акустические волны, температурные градиенты, 3D лазерные доплеровские анемометры, ультразвук, режим коммутации, стационарный режим, оптическая плотность, температурное расширение, сдвиг фазы.

### **Введение**

В современных лазерных доплеровских измерителях скорости [1–5] смещение частоты доплеровского сигнала в удобную для обработки область осуществляется при помощи акустооптических модуляторов (АОМ) [6]. Это позволяет расширить динамический диапазон доплеровских систем и провести оптимальную фильтрацию сигнала от аддитивной составляющей. Помимо смещения частоты АОМ расщепляют лазерные пучки с необходимым соотношением интенсивностей [1–9].

В металлургии используют лазерные измерители скорости и длины проката с полупроводниковыми лазерами [1], нестабильность длины волны которых составляет 0,5 % [10]. Если не применять специальных мер, то относительная погрешность измерения скорости и длины объектов будет определяться данной величиной. Применение дифракционных расщепителей в лазерных доплеровских измерителях скорости и длины объектов позволяет решить эту проблему. АОМ, являясь модулятором, работающим по принципу дифракции свето-

вой волны на бегущей фазовой решетке, хорошо подходит для работы в приборах с полупроводниковыми лазерами. В таких системах измерения скорости и длины объектов потенциальная относительная погрешность определения скорости зависит главным образом от относительной нестабильности скорости звука в звукопроводе АОМ. В связи с этим исследование тепловых характеристик АОМ, определяющих относительную стабильность скорости ультразвуковой волны в модуляторе, является актуальной задачей. Следует заметить, что предъявляемые требования к точности работы современных измерителей скорости и длины (относительная погрешность измерения не превышает 0,1 %) диктуют необходимость учитывать тепловые эффекты в АОМ, приводящие к относительно нестабильности скорости звука порядка 0,01...0,1 %.

В некоторых схемах доплеровских измерителей 3-D вектора скорости объектов АОМ работает в коммутационном режиме, что позволяет использовать один фотоприемник и надежно «развязать» измеряемые компоненты от взаимного влияния. При этом в каждый момент времени измеряется одна из ортогональных компонент вектора скорости. На таком принципе работает лазерный доплеровский измеритель скорости с адаптивной временной селекцией компонент скорости ЛДА АВС [2]. Если скорости объектов (потоков жидкостей и газов) малы или режим течения нестационарный, время между переключениями измеряемых компонент может оказаться достаточно большим, что приведет к смене теплового режима (средняя температура и пространственное распределение температур) в звукопроводе АОМ. Это в свою очередь может вызвать значительные ошибки при измерении компонент вектора скорости. В связи с этим измерение динамики изменения оптической плотности активной зоны звукопровода АОМ является чрезвычайно важной и актуальной задачей, так как позволяет оценить возможные ошибки изме-

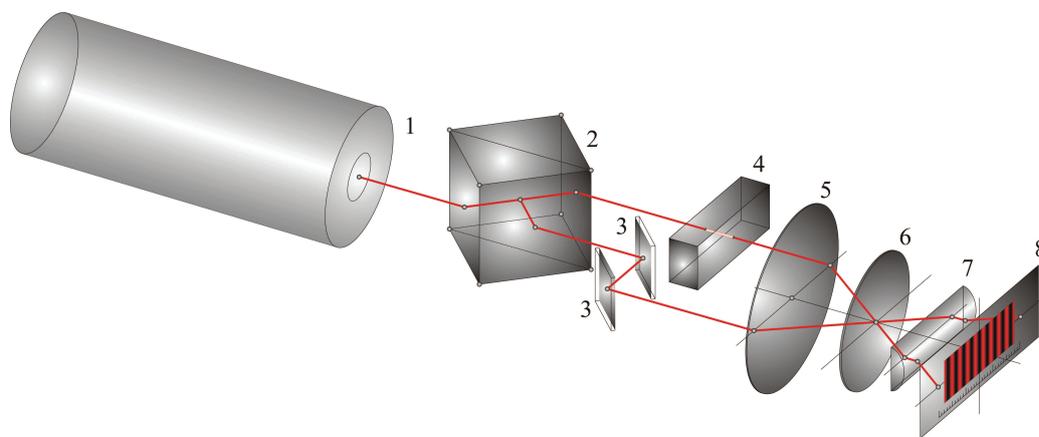
рения при работе системы в коммутационных режимах. Следует добавить, что требования к точности устройств непрерывно увеличиваются, при этом потребность в точной информации о работе АОМ также со временем возрастает. Решения задач, встающих перед разработчиками лазерных доплеровских измерителей скорости в связи с использованием АОМ, могут быть полезными и в других сферах (дальномеры, системы развертки и т. д.) [11–18]. Принципы работы акустооптических модуляторов подробно описаны в соответствующей литературе [6] и поэтому рассматриваться в данной статье не будут.

При эксплуатации твердотельных АОМ в измерительных системах с коммутацией [2, 19] тепловые эффекты могут приводить к снижению точности. Цель данного исследования – изучение тепловых процессов, сопровождающих работу твердотельного акустооптического модулятора. Данный вопрос поднимался рядом авторов [6, 20], однако подробное экспериментальное исследование особенностей применения устройства в системах доплеровской диагностики с учетом динамики не проводилось.

#### Описание метода измерений

Изменение температуры в среде вызывает изменение оптической плотности, которое хорошо регистрируется интерферометрическими методами. Изменение оптической плотности приводит к появлению оптической разности хода и вызывает смещение интерференционных полос. Оптическая разность хода связана с температурой среды через термооптический коэффициент.

На рис. 1 изображена схема измерительной системы. Излучение гелий-неонового лазера – 1 направляется на расщепительный кубик – 2, разделяющий пучок лазера на два. В один из пучков помещается модулятор – 4, расположенный на координатном столе, имеющем степени свободы в вертикальном и горизонтальном направлении. Вто-



**Рис. 1.** Измерительная система: 1) гелий-неоновый лазер ( $\lambda=632,8$  нм); 2) расщепительный кубик; 3) зеркало; 4) акустооптический модулятор; 5) объектив; 6) отрицательная линза; 7) цилиндрическая линза; 8) экран

**Fig. 1.** Measurement system: 1) helium-neon laser; 2) split cube; 3) mirror; 4) acoustooptical modulator; 5) lens; 6) negative lens; 7) cylindrical lens; 8) screen

рой пучок юстируется поворотными зеркалами – 3 с целью обеспечения параллельности расщепленных пучков. Параллельные пучки, после модулятора – 4 и зеркал – 3 проходя через объектив – 5, пересекаются в фокальной плоскости. Увеличенное изображение области пересечения с помощью отрицательной линзы – 6 переносится в плоскость экрана – 8, где проводятся измерения. Для удобства регистрации использовалась цилиндрическая линза – 7, сжимающая интерференционную картину в вертикальном направлении вдоль направления интерференционных полос.

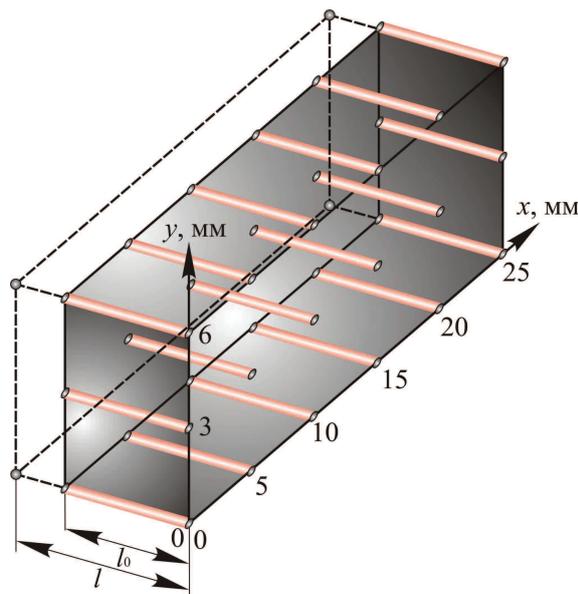


Рис. 2. Измерение оптической плотности

Fig. 2. Measurement of optical density

Изменение оптической толщины образца можно выразить в виде

$$\Delta L = L - L_0,$$

где  $L_0 = l_0(n_0 - 1)$ ,  $L = l(n - 1)$ . Здесь  $L$  – оптическая толщина звукопровода при температуре  $T$ ;  $L_0$  – оптическая толщина звукопровода при температуре  $T_0$ ;  $l$  – толщина звукопровода при температуре  $T$ ;  $l_0$  – толщина звукопровода при температуре  $T_0$  (рис. 2);  $n$  – показатель преломления материала звукопровода при температуре  $T$ ;  $n_0$  – показатель преломления материала звукопровода при температуре  $T_0$ . Изменение оптической толщины  $\Delta L$  связано как с температурным изменением геометрической толщины звукопровода, так и с температурным изменением показателя преломления

$$\begin{aligned} \Delta L &= L - L_0 = (n - 1)l - (n_0 - 1)l_0 = \\ &= [(n_0 + \beta \Delta T) - 1] \cdot (1 + \alpha \Delta T)l_0 - (n_0 - 1)l_0. \end{aligned}$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала;  $\beta = dn/dT$  – приращение показателя преломления при повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$ ,

$$\begin{cases} n = n_0 + \beta \Delta T, \\ l = l_0 [1 + \alpha \Delta T], \end{cases}$$

где  $\Delta T = T - T_0$ . Раскрывая скобки и пренебрегая членом  $\alpha \beta l_0 (\Delta T)^2$ , ввиду его малости, получим:

$$\Delta L = l_0 \Delta T \left[ \alpha + \frac{\beta}{n_0 - 1} \right] (n_0 - 1). \quad (1)$$

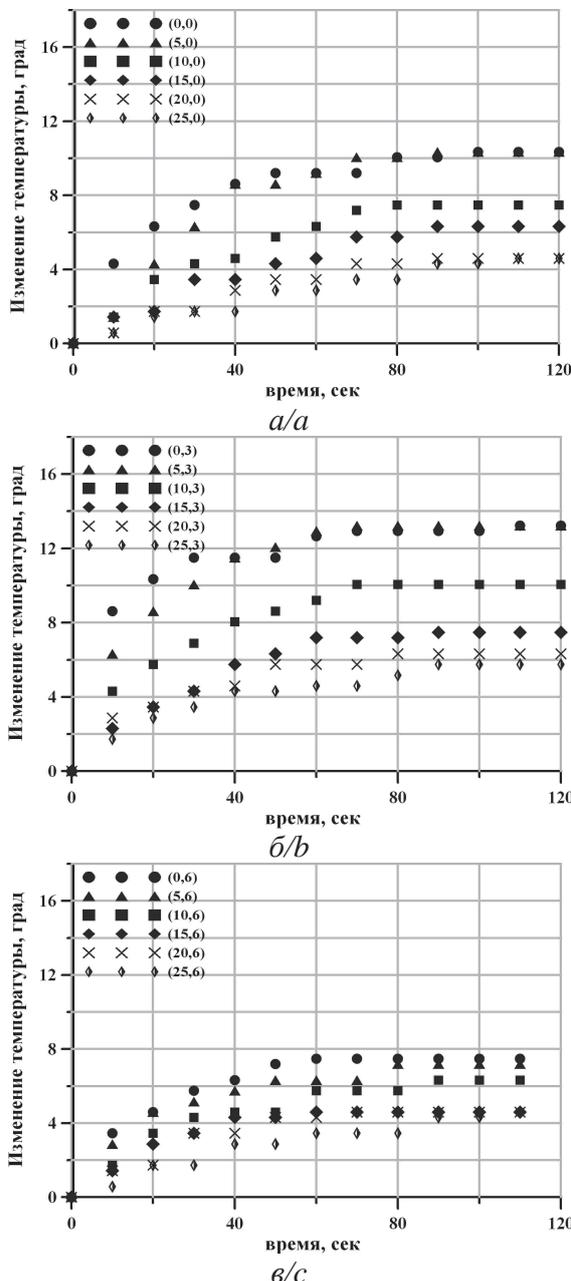


Рис. 3. Динамика изменения температуры в твердотельном акустооптическом модуляторе (а, б, в)

Fig. 3. Dynamics of temperature change in solid-state acousto-optical modulator (a, b, c)

Вычислим изменение температуры при смещении интерференционной картины на одну полосу. При этом  $\Delta L = \lambda$ .

$$\Delta T = \frac{\lambda}{l_0 \left[ \alpha + \frac{\beta}{n_0 - 1} \right] (n_0 - 1)},$$

где  $\lambda=632,8$  нм – длина волны He-Ne-лазера;  $l_0=10$  мм – геометрический размер звукового столба. Для материала звукопровода (МЛ-201, ТФ-7) значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  равны:  $\alpha=0,96 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta=4,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $n_0-1=0,73$ . Подставив данные коэффициенты в формулу (1), получим:  $\Delta T=5,75$  °С – изменение температуры при смещении интерференционной картины на одну полосу.

#### Экспериментальные результаты

В эксперименте на АОМ, находящийся при температуре окружающей среды  $\approx 25$  °С, подавалось рабочее высокочастотное (80 МГц) питание мощностью 2 Вт. В этом режиме акустооптический модулятор отклоняет половину падающего на него лазерного излучения на угол, равный углу Брэгга. При такой мощности возбуждающей волны АОМ служит в качестве расщепителя световых пучков в ЛДА. После подачи питания звукопроводящая среда начинает нагреваться, а  $t=0$  соответствует моменту подачи питания. Через время  $\approx 60$  с происходит стабилизация температуры внутри звукопровода, и интерференционные полосы перестают смещаться.

На рис. 3 (а–в) представлена динамика изменения средней температуры в выбранных локальных сечениях рис. 2. Используются следующие обозначения (а, б) – координаты локальных сечений, в

которых проводились измерения; а – координата по оси  $x$ , б – координата по оси  $y$  в миллиметрах (рис. 2). Ультразвуковой источник расположен вблизи точки (0, 3).

#### Заключение

Максимальное изменение оптической толщины звукопровода наблюдается в акустическом столбе непосредственно вблизи генератора УЗ волны и составляет величину  $\approx 2,5$  интерференционной полосы, что соответствует изменению температуры на величину  $\approx 14$  °С (рис. 3, б). В удаленной от генератора области смещение полос  $\approx 0,8$ , что составляет 4 °С. Таким образом, температурный градиент по длине УЗ столба ( $\approx 25$  мм) 10 °С. Такой градиент температуры вызовет отклонение световой волны на выходе АОМ на существенный угол. Это серьезный тепловой эффект, который может значительно ограничить сферу применения твердотельных акустооптических модуляторов. Можно предположить, что увеличение мощности приведет к большим тепловым градиентам.

Тепловые эффекты в АОМ существенно влияют на точность измерения скорости в ЛДА АВС. При малых скоростях исследуемых объектов или при малых концентрациях рассеивающих частиц ( $\sim 1$  частица в минуту) погрешность измерения составит величину 0,5 % (т. е. снизится почти на порядок).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н., Меледин В.Г. Оптический измеритель скорости на основе полупроводникового лазера // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15. – № 3. – С. 633–635.
2. Лазерный доплеровский анемометр с временной селекцией ортогональных компонент вектора скорости / П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев, В.Г. Меледин, В.А. Павлов // Автометрия. – 1988. – № 2. – С. 43–49.
3. Belousov P.Ya., Dubnistshev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers // Optics & Laser Technology. – 1990. – V. 22. – № 5. – P. 335–339.
4. Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н. Лазерный метод измерения трехмерного вектора скорости // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 1. – С. 79–82.
5. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. радио, 1978. – 112 с.
7. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. Брэгговская акустооптическая дифракция на частотно-модулированной звуковой волне – угловое расщепление дифракционного порядка // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 4. – С. 472–479.
8. Анизотропная акустооптическая дифракция как метод измерения и формирования углового спектра лазерного излучения / С.Н. Антонов, А.В. Вайнер, В.В. Проклов, И.Ф. Янгиров // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – № 7. – С. 889–895.
9. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенов В.П. Исследование режима дифракции лазерного пучка на линейно частотно-модулированной акустической волне в анизотропном акустооптическом дефлекторе // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2011. – № S2 – С. 31–41.
10. Баркан И.Б., Павленко Л.К., Павлов В.Е. Особенности спектральной перестройки полупроводникового лазера ИПЛН-102 // Переключаемые лазеры: сборник научных трудов. – Новосибирск: Институт теплофизики, 1988. – С. 73–87.
11. Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур / А.В. Кирьянов, В.А. Жмудь, И.Н. Томилов, Д.А. Котин, Д.О. Терешкин, А.В. Останин // Научный вестник НГТУ. – 2013. – Т. 52. – № 3. – С. 46–50.
12. Kastelik J.-C., Dupont S., Gazalet J., Yushkov K.B. Frequency and angular bandwidth of acousto-optic deflectors with ultrasonic walk-off // Ultrasonics. – 2013. – V. 53. – № 1. – P. 219–224.
13. Тонкая структура кривой погрешности углового преобразователя / В.П. Кирьянов, А.В. Кирьянов, А.А. Лубков, В.В. Чуканов // Научный вестник НГТУ. – 2013. – Т. 52. – № 3. – С. 51–54.
14. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканерами // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – № 1. – С. 116–126.
15. Zhang S., Wang L. Optical proximity correction for low resolution acoustooptic modulator // Guangdong Gongcheng/Opto-Electronic Engineering. – 2012. – V. 39. – № 4. – P. 129–135.
16. Бессмельцев В.П., Ралдугин А.Н., Служев В.А. Многоканальная система управления акустооптическим модулятором лазерного излучения на основе прямого синтеза частот // Автометрия. – 2013. – Т. 49. – № 6. – С. 79–85.
17. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенов В.П. Управление пространственным спектром лазерного пучка с помощью частотно-манипулированных сигналов в лазерных сканирующих системах телеориентации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2012. – № 3 – С. 38–53.

18. Direct observation of femtosecond pulse buildup in self-mode-locked laser using an intracavity acoustooptic modulator / S. Kinoshita, E. Ito, M. Omori, S. Ueki // Japanese Journal of Applied Physics. – 2002. – V. 40. – № 11. – P. 6430–6434.
19. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптическая коммутация элементов в информационно-измерительных системах // Датчики и системы. – 2013. – Т. 165. – № 2. – С. 33–37.
20. Spatial and temporal thermal analysis of acousto-optic deflectors using finite element analysis model / R. Jiang, Z. Zhou, X. Lv, S. Zeng, Z. Huang, H. Zhou // Ultrasonics. – 2012. – V. 52. – № 5. – P. 643–649.

Поступила 14.05.2014 г.

UDC 535.8

## TEMPERATURE DYNAMICS INTERFERENCE MEASURING IN SOLID-STATE ACOUSTOOPTICAL MODULATORS

**Andrey P. Belousov,**

Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: abelousov@ngs.ru

**Peter Ya. Belousov,**

Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: pyabelousov@ngs.ru

**Leonid A. Borynyak,**

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: borynyak-leonid@mail.ru

*The relevance of the work is determined by the necessity of solid-state acoustooptical modulators effective using in a wide range of technical devices such as deflectors, frequency shift setups, sweeping tools, optical beam splitters, laser Doppler anemometers et cetera.*

**The main aim of the study:** investigation of temperature dynamics in solid-state acoustooptical modulators by non-invasive optical methods; substantiation of solid-state acoustooptical modulators switching mode using in devices; estimation of applicability range and possible operating biases.

**The methods used in the study:** measurement of light wave phase shift induced by solid-state acoustooptical modulator active area geometrical characteristics and optical density thermal alterations. Estimation of temperature integral changing depending on time and interrogation beam location in acoustic transmission duct. A two-beam interferometer was used. Helium-neon laser emission with wavelength  $\lambda=632,8$  nm and power 0,5 mW was divided into two rays by beam splitting cube. The acoustooptical modulator was placed in one of the beams. A phase shift produced by geometric parameters of investigated object and optical density changings was determined by interference fringe shift. Methods of image analysis, interferometry, photometry, acoustooptics, material science, coherent optics, laser physics.

**The results:** The authors have measured the light wave phase shift caused by alterations of optical density and object thickness. Temperature integral change was estimated depending on time and probing beam location in acoustic transmission duct of acoustooptical modulator. The warm-up period of optical modulator was defined. The findings revealed that measuring maximal error magnitude of flow velocity with low event's frequency of light-diffusing tracers for solid-state acoustooptical modulator switching mode would equal 0,5 %. The measurement accuracy can be increased by usage of error correction algorithms.

### **Key words:**

Solid-state acoustooptical modulator, interferometry, diffraction, acoustical wave, thermal gradient, 3D laser Doppler velocimeter, ultrasound, switching mode, stationary mode, optical density, thermal expansion, phase shift.

## REFERENCES

1. Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeter based on semiconductor laser. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, vol. 18, no. 3, pp. 405–407.
2. Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N., Meledin V.G., Pavlov V.A. *Lazernyy doplerovskiy anemometr s vremennoy selektsiei ortogonalnykh component vektora skorosti* [Laser Doppler anemometer with temporal selection of orthogonal velocity vector components]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 1988, no. 2, pp. 43–49.
3. Belousov P.Ya., Dubnistshev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers. *Optics & Laser Technology*, 1990, vol. 22, no. 5, pp. 335–339.
4. Belousov P.P., Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N. A laser method for measuring the three-dimensional velocity vector. *Quantum Electronics*, 2001, vol. 31, no. 1, pp. 79–82.
5. Dubnishchev Yu.N., Rinkevichyus B.S. *Metody lazernoy doplerovskoy anemometrii* [Methods of laser Doppler anemometry]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 304 p.
6. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acoustooptic systems and their using]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 112 p.
7. Antonov S.N., Rezvov Yu.G. *Breggovskaya akustoopticheskaya difraktsiya na chastotno-modulirovannoy zvukovoy volne – ugiyovoe rasshechleniye difraktsionnogo poriyadka* [Bragg acoustooptic diffraction by a frequency-modulated acoustic wave: angular splitting of the diffraction order]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2005, vol. 50, no. 4, pp. 472–479.
8. Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Yangirov I.F. Anisotropic acousto-optic diffraction as a method to measure and control the angular spectrum of laser radiation. *Journal of communications technology and electronics*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 900–905.
9. Bondarenko D.A., Karasik V.E., Semenov V.P. *Issledovanie rezhima difraktsii lazernogo puchka na lineynoy chastotno-modulirovannoy akusticheskoy volne v anizotropnom akustoopticheskom deflektore* [Studying the regime of laser beam diffraction on linearly frequency-modulated acoustic wave at anisotropic acousto-optic deflector]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroeniye*, 2011, no. S2, pp. 31–41.
10. Barkan I.B., Pavlenko L.K., Pavlov V.E. *Osobennosti spektralnoy perestroyki poluprovodnikovogo lasera IPLN-102* [Semiconductor laser IPLN-102 spectral tuning specificities]. *Sbornik nauchnykh trudov: Perestroykaemye lasery* [Collected papers: tuned lasers]. Novosibirsk, Institut teplofiziki, 1988. pp. 73–87.
11. Kiryanov A.V., Zhmud V.A., Tomilov I.N., Kotin D.A., Tereshkin D.O., Ostanin A.V. *Povysheniye tochnostnykh parametrov lazernykh generatorov izobrazheniy s krugovym skanirovaniem dlya formirovaniya pretsizionnykh ugloizmeritelnykh struktur* [Accuracy enhancement of circular laser pattern generator for precision angle measurement structures]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 46–50.
12. Kastelik J.-C., Dupont S., Gazelet J., Yushkov K. B. Frequency and angular bandwidth of acousto-optic deflectors with ultrasonic walk-off. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 219–224.
13. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Lubkov A.A., Chukanov V.V. *Tonkaya struktura krivoy pogreshnosti uglovogo preobrazovatelya* [Small-size structure of angle encoder error curve]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 51–54.
14. Bessmeltsev V.P., Goloshevsky N.V. Control system for complementary two-coordinate scanning devices. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 90–98.
15. Zhang S., Wang L. Optical proximity correction for low resolution acoustooptic modulator. *Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Engineering*, 2012, vol. 39, no. 4, pp. 129–135.
16. Bessmeltsev V.P., Raldugin A.N., Sluev V.A. Multichannel control system for an acousto-optical modulator of laser radiation based on direct digital synthesis of frequencies. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 592–597.
17. Bondarenko D.A., Karasik V.E., Semenov V.P. *Upravleniye prostanstvennyim spektrom lazernogo puchka s pomoshchyu chastotno-manipulirovannykh signalov v lazernykh skaniruyushchikh sistemakh teleorientatsii* [Control of spatial spectrum of laser beam using frequency-shift signals in laser scanning tele-orientation systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroeniye*, 2012, no. 3, pp. 38–53.
18. Kinoshita S., Ito E., Omori M., Ueki S. Direct observation of femtosecond pulse buildup in self-mode-locked laser using an intracavity acoustooptic modulator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 40, no. 11, pp. 6430–6434.
19. Davidov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. *Akustoopticheskaya kommutatsiya elementov v informatsionno-izmeritelnykh sistemakh* [Elements' acousto-optic switching in information-measuring systems]. *Datchiki i sistemy*, 2013, vol. 165, no. 2, pp. 33–37.
20. Jiang R., Zhou Z., Lv X., Zeng S., Huang Z., Zhou H. Spatial and temporal thermal analysis of acousto-optic deflectors using finite element analysis model. *Ultrasonics*, 2012, vol. 52, no. 5, pp. 643–649.

Received: 14 May 2014.