

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ КОММУТАТОР ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ АНЕМОМЕТРОВ

Павлов В.А.<sup>1</sup>, Бакакин Г.В.<sup>1</sup>, Главный В.Г.<sup>1</sup>, Кротов С.В.<sup>1</sup>, Куликов Д.В.<sup>1</sup>,  
Рахманов В.В.<sup>1</sup>, Садбаков О.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН», Новосибирск (630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1), e-mail: pavlov@itp.nsc.ru

Развитие современных фундаментальных исследований в области гидро- и аэродинамики связано с использованием новейшей диагностической и инструментальной базы. Лазерные доплеровские анемометры позволяют бесконтактно получать точную информацию о компонентах вектора скорости исследуемого потока в малой области измерения. Одновременное измерение двух ортогональных компонент вектора скорости осуществляется обычно лазерными анемометрами, имеющими двухканальную структуру с делением мощности лазерного излучения между каналами. Недостатком этих устройств является малая эффективность использования мощности лазерного излучения, поскольку на оптический канал, измеряющий одну компоненту скорости, приходится менее половины энергии лазерного источника. Акустооптическая коммутация оптико-электронных измерительных каналов лазерных доплеровских анемометров позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и точность измерений, но связана с необходимостью решения ряда серьезных научно-технических проблем. Создан акустооптический коммутатор, обеспечивающий синхронную коммутацию лазерных зондирующих пучков и электронного сигнального процессора, низкий уровень коммутационных помех в оптических и электронных измерительных каналах и высокое быстродействие. Применение разработанного акустооптического коммутатора оптических измерительных каналов в новейших лазерных полупроводниковых доплеровских анемометрах серии «ЛАД-0xx» обеспечило диапазон измеряемых скоростей по двум компонентам вектора скорости  $\pm 0,01...200$  м/с с погрешностью измерения средней скорости  $\pm 0,5\%$ .

Ключевые слова: лазерный анемометр, коммутация, акустооптический модулятор.

## ACOUSTO-OPTIC SWITCH OF OPTICAL MEASURING CHANNELS OF LASER DOPPLER ANEMOMETERS

Pavlov V.A.<sup>1</sup>, Bakakin G.V.<sup>1</sup>, Glavniy V.G.<sup>1</sup>, Krotov S.V.<sup>1</sup>, Kulikov D.V.<sup>1</sup>, Rahmanov V.V.<sup>1</sup>,  
Sadbakov O.Y.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk (630090, Novosibirsk, Lavrentiev av., 1), e-mail: pavlov@itp.nsc.ru

The development of modern fundamental research in the field of hydro and aerodynamics connected with use modern diagnostic and instrumental base. Laser Doppler anemometers allow to non-invasively receiving accurate information about components of the velocity vector of investigated flow in the small area of measurement. Simultaneous measurement of two orthogonal components of the velocity vector is usually executed by laser anemometry, having a dual structure with the division of the laser radiation power between the channels. The disadvantage of these devices is low efficiency of using laser radiation power, because measuring one velocity component optical channel have less than half of laser source energy. Application of switching of optical-electronic measuring channels of laser Doppler anemometers allows to raise essentially the relation a signal/noise and accuracy of measurements. Implementation of a switching mode is interfaced to necessity of the decision of some problems. The developed acousto-optic switchboard provides the synchronous switching of laser probing bundles and the electronic signal processor and low level of switching noises in optical and electronic measuring channels, it possesses high high-speed performance. Application of the developed acousto-optic switchboard of optical measuring channels in LAD-0xx laser Doppler anemometers provided a range of measured speeds on two components  $\pm 0,01 ... 200$  mps with the average rate measurements error  $\pm 0,5\%$ .

Key words: switching, the acousto-optic modulator, laser anemometer.

### Введение

Развитие современных фундаментальных исследований в области гидро- и аэродинамики связано с использованием новейшей диагностической и инструментальной базы [5]. Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) позволяют бесконтактно получать

точную информацию о компонентах вектора скорости исследуемого потока в малой области измерения [3]. Одновременное измерение двух ортогональных компонент вектора скорости осуществляется обычно лазерными анемометрами, имеющими двухканальную структуру с делением мощности лазерного излучения между каналами. Недостатком этих устройств является малая эффективность использования мощности лазерного излучения, поскольку на оптический канал, измеряющий одну компоненту скорости, приходится менее половины энергии лазерного источника. Указанный недостаток особенно сильно проявляется при измерениях скорости в режиме обратного рассеяния, когда интенсивность светового сигнала падает в среднем на два-три порядка по сравнению с интенсивностью света, рассеянного вперед. На практике обычно используется хроматическое либо частотное разделение каналов. При хроматической селекции дополнительная погрешность появляется из-за дисперсии коэффициента преломления в воде или исследуемых средах [1].

### **Методы исследований**

Акустооптическая коммутация оптико-электронных измерительных каналов ЛДА позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и точность измерений. При этом используется полная мощность лазерного излучения в каждом оптическом измерительном канале, что особенно эффективно в случае необходимости дистанционных измерений в режиме обратного рассеяния на естественных неоднородностях, взвешенных в исследуемом потоке.

Коммутация зондирующих когерентных полей возможна за счет управления током накачки полупроводниковых лазеров. Однако управление мощностью излучения за счет изменения параметров накачки лазера приводит к ухудшению когерентности излучения и, соответственно, к снижению точности работы доплеровского измерителя скорости в целом. Реализация коммутационного режима в ЛДА сопряжена с необходимостью решения ряда серьезных научно-технических проблем. В первую очередь это обеспечение точного синхронизма коммутации лазерных зондирующих пучков и электронного сигнального процессора, а также низкого уровня коммутационных помех в оптических и электронных измерительных каналах [2].

Одним из наиболее перспективных подходов к построению коммутируемого двухканального ЛДА является схема с коммутатором на основе оптически сопряженных ортогонально ориентированных акустооптических модуляторов (АОМ) (рис. 1).

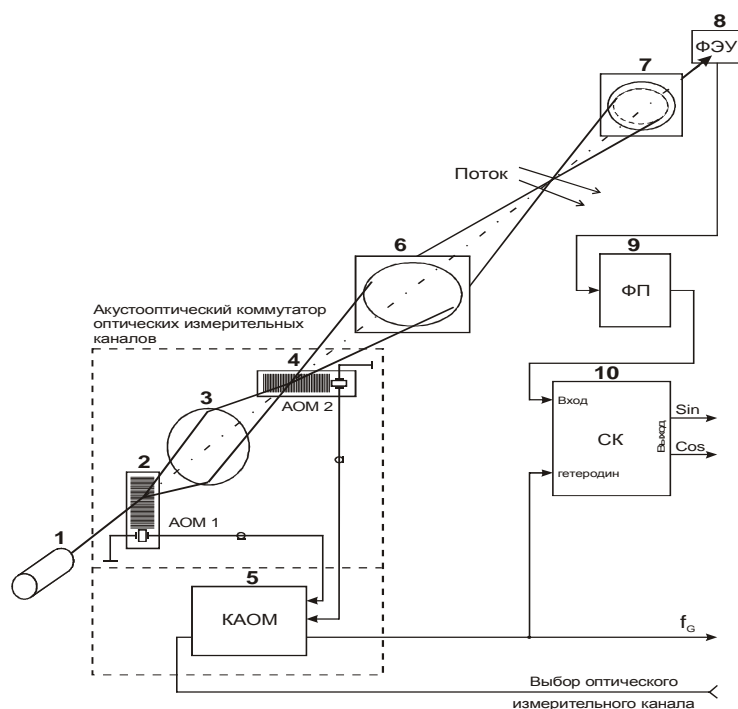


Рис. 1. Структурная схема двухканального ЛДА с акустооптической коммутацией каналов

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – лазер; 2 – акустооптический модулятор первый (АОМ 1); 3 – объектив; 4 – акустооптический модулятор второй (АОМ 2); 5 – коммутатор акустооптических модуляторов; 6 – оптическая формирующая система; 7 – оптическая приемная система; 8 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 9 – фильтр доплеровского сигнала; 10 – смеситель квадратурный.

Двухчастотный коммутационный ЛДА, показанный на рис. 1, работает следующим образом. Луч лазера 1 попадает на модулятор 2. На выходе модулятора, работающего в режиме дифракции Брэгга, формируются два световых пучка, дифрагированных в нулевой и первый порядки. Объектив 3 оптически совмещает точки расщепления лазерного пучка акустооптических модуляторов. Направления распространения ультразвуковых волн в модуляторах взаимно ортогональны и соответствуют ориентации измеряемых компонент вектора скорости.

Расщепленные пучки проходят через второй модулятор 4 и направляются оптической формирующей системой 6 в исследуемую область потока, скорость которого необходимо измерить. Пересекаясь в потоке, лазерные пучки образуют интерференционное поле с известной периодической структурой, изображение которого в рассеянном свете формируется приемной оптической системой 7 на светочувствительной поверхности фотоэлектронного умножителя 8. С выхода ФЭУ электрический сигнал через фильтр пьедестала 9 поступает на вход квадратурного смесителя 10.

Квадратурный смеситель переносит спектр выходного сигнала фотоприемника в область нулевой частоты, сохраняя информацию о знаке частоты доплеровского радиосигнала и представляя ее в виде относительной фазы выходных радиосигналов. Сигнал гетеродина  $f_G$  формируется в коммутаторе акустооптических модуляторов 5. Сигнал, управляющий акустооптическими модуляторами, поступает с сигнального процессора ЛДА, реализующего метод адаптивной временной селекции.

### Практическая реализация

Функциональная схема разработанного коммутационного акустооптического преобразователя сигналов представлена на рис. 2. Преобразователь состоит из индикатора мощности 1, модуля питания 2, кварцевого генератора опорной частоты  $F_{оп}$  3, буферных усилителей 4 и 5, двух коммутаторов с противофазным управлением TTL-уровнями 6 и 7, предварительных резонансных усилителей 8 и 9, регулируемых окончательных усилителей 10 и 11 и цепей согласования 12 и 13.

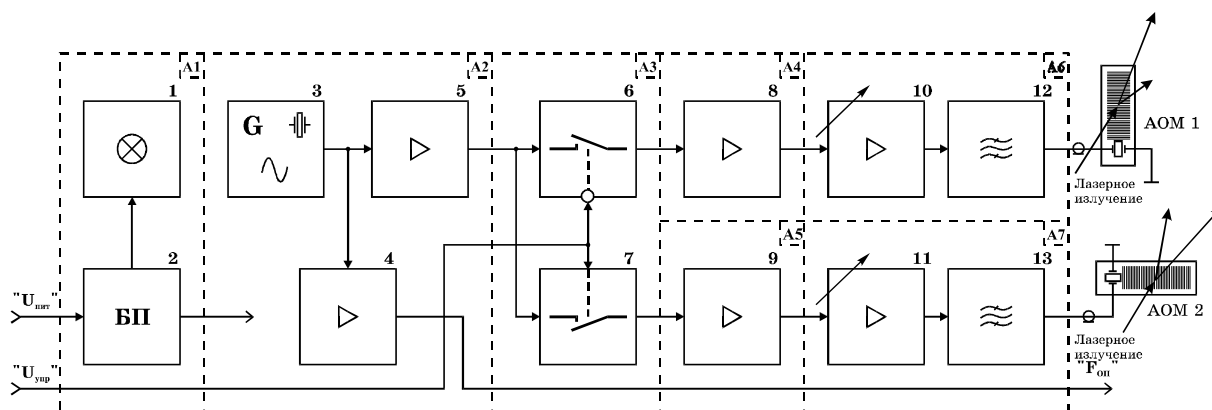


Рис. 2. Коммутационный акустооптический преобразователь сигналов с дискретным и регулируемым интервалом частотного смещения

Коммутационный преобразователь работает следующим образом. Сигнал кварцевого генератора 1 через буферный усилитель 4 поступает на внешний выход « $F_{оп}$ », а через буферный усилитель 5 – на сигнальные входы коммутаторов 6 и 7. Управляющие входы коммутаторов соединены и подключены ко входному разъему « $U_{уп}$ ». Состояние коммутаторов определяется логическим уровнем на данном входе. Уровень логического нуля открывает коммутатор 6, закрывая коммутатор 7, уровень логической единицы закрывает коммутатор 6, открывая коммутатор 7. Выходные сигналы коммутаторов подаются через резонансные двухкаскадные предварительные усилители 8 и 9 на регулируемые окончательные усилители 10 и 11, к выходам которых через цепи согласования 12 и 13 подключены акустооптические модуляторы «АОМ X» и «АОМ Y».

Выходная мощность каждого канала управления устанавливается регулируемым усилителем так, чтобы интенсивность прямого и дифрагировавшего лазерных пучков была одинаковой. Индикатор 1 показывает наличие питания модуля. Цепи согласования 12 и 13 обеспечивают заданную длительность фронта и спада радиоимпульсов сигнала, управляющего АОМ (рис. 3).

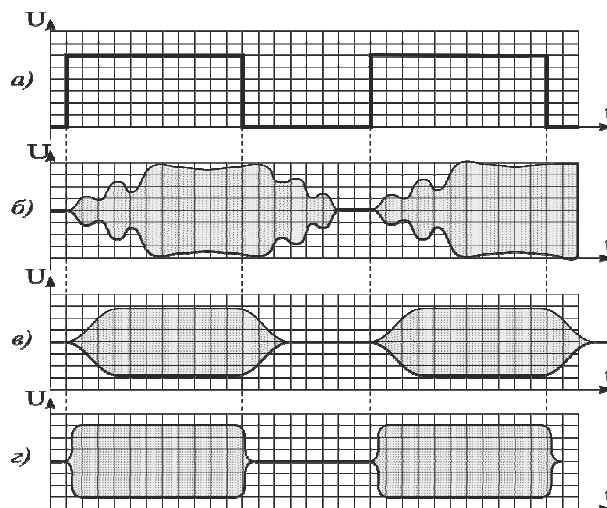


Рис. 3. Осциллограммы сигнала управления АОМ

На рис. 3 показаны осциллограммы сигналов: управляющие сигналы коммутации каналов (а); АОМ несогласован с оконечным усилителем мощности (б); цепь согласования не обеспечивает заданную длительность фронта и спада радиоимпульсов (в); цепь согласования обеспечивает заданную длительность фронта и спада радиоимпульсов (г).

АОМ и коаксиальные кабели, соединяющие модуляторы с выходными каскадами оконечных усилителей коммутатора, обладают нескомпенсированными реактивными сопротивлениями. Для различных АОМ и различных длин кабеля величина этих реактивных сопротивлений варьируется в широких пределах. Поэтому обязательными являются цепи согласования импедансов выходных каскадов оконечных усилителей мощности и акустооптических модуляторов. Кроме того, эти цепи осуществляют эффективную фильтрацию гармоник выходных напряжений усилителей. Характеристики выходных трактов устройства управления АОМ соответствуют оптимальным фильтрам Бесселя, обеспечивая устойчивую работу преобразователя в переходных режимах.

Разработанный авторами акустооптический коммутатор реализован на современной элементной базе и обеспечивает синхронную коммутацию лазерных зондирующих пучков и электронного сигнального процессора, низкий уровень коммутационных помех в оптических и электронных измерительных каналах, обладает высоким быстродействием. Технические параметры акустооптического коммутатора оптических измерительных каналов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Единица измерения	Значение
Частота управляющих и опорного напряжений	МГц	80±0,05%
Выходная мощность каналов управления АОМ	Вт	0 – 4
Сопротивление нагрузки	Ом	50
Амплитуда гетеродинного сигнала	В	1
Длительность фронта и спада радиоимпульсов сигнала, управляющего АОМ, не более	нс	300

### Выводы

Акустооптический коммутатор оптико-электронных измерительных каналов реализован в лазерных доплеровских анемометрах «ЛАД-05», «ЛАД-06», «ЛАД-056» [2], выпускаемых ОАО «ИОИТ» и успешно используемых во многих научных учреждениях, вузах и промышленных предприятиях России. Применение разработанного акустооптического коммутатора оптических измерительных каналов в этих анемометрах обеспечило диапазон измеряемых векторов скоростей по двум компонентам  $\pm 0,01 \dots 200$  м/с с погрешностью измерения средней скорости  $\pm 0,5\%$ .

*Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ ГК № 11.519.11.6022.*

### Список литературы

1. Дубнищев Ю.Н. [и др.] Оптические методы исследования потоков. – Новосибирск, Сибирское университетское изд-во, 2003. – 418 с.
2. Меледин В.Г. [и др.] Лазерная доплеровская измерительная система для 3D-диагностики многофазных газожидкостных потоков ЛАД 056 // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование : сб. трудов Третьей международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (14-17 марта 2007 г., Санкт-Петербург) / под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, В.Ф. Самохина. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 110-114.
3. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // ЖТФ. - 2007. – Т. 77. - № 5. - С. 47-57.
4. Рахманов В.В. [и др.] Особенности ЛДА-измерений в натуральных гидродинамических экспериментах // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 3 : сб. трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (27–

29.04.2011, Санкт-Петербург) / под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - С. 196-197.

5. Meledin V.G. Informatics of Optoelectronic Measurements: Science and Innovative Industrial Technologies // Journal of Engineering Thermophysics. - 2009. - Vol. 18. – No. 2. – P. 99-128.

**Рецензенты:**

Бердников Владимир Степанович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Лежнин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.