

УДК 681.2.08

## СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНОГО РЕВЕРСИВНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

Кротов С. В., Меледин В. Г., Бакакин Г. В., Кабардин И. К., Наумов И. В., Рахманов В. В.

*ФГБУН "Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН", Новосибирск (630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1), E-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)*

Исследование высокоскоростных газожидкостных потоков актуально для авиационной и космической техники. Диапазон измерения скоростей и пульсаций имеющихся точных измерительных приборов недостаточен. Предложено решение, расширяющее возможности лазерного реверсивного доплеровского измерителя скорости. Разработана новая структура модуля обработки измерителя на основе современного высокопроизводительного 6-ти ядерного сигнального процессора TMS320C6472 и высокоскоростных АЦП ADS62P49 с частотой оцифровки сигналов до 250 МГц. Разработан новый модуль обработки и программное обеспечение, позволяющие обрабатывать данные скорости газожидкостных потоков с темпом до 100 кГц/сек. Прибор позволяет с высокой точностью измерять в газожидкостных потоках скорости до 3000 км/ч и пульсации с частотами до 50 кГц.

Ключевые слова: ЛДИС, лазерный, доплеровский, измеритель, система, модуль обработки.

## THE PROCESSING MODULE OF LASER REVERSAL DOPPLER MEASURING SYSTEM

Krotov S. V., Meledin V. G., Bakakin G. V., Kabardin I. K., Naumov I. V., Rahmanov V. V.

*Institute of Thermophysics SB RAS ", Novosibirsk (630090, Novosibirsk, Lavrentiev av., 1), E-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)*

In the fields of aviation and space technology, the study of high-speed gas-liquid flows is relevant because there is a lack of precise measuring devices, and the measuring range of speed and pulsation possible with available devices is insufficient. Authors offer a solution that extends the capabilities of the LDMS devices. This paper proposes a new structure of the LDMS processing module made on the base of modern high-efficiency 6-core signal processor TMS320C6472 and high-speed ADC ADS62P49 with sampling rate up to 250 MHz signals. This new processing module and attached software enable the LDMS to calculate the gas-liquid flows speed at a rate of up to 100 kHz / sec. On the basis of this structure it's possible to create a LDMS that enables high-precision measurement of gas-liquid flows rates of up to 3000 km/h, and pulsation with frequencies up to 50 kHz.

Key words: laser, Doppler, measuring system, reversal measuring system, Doppler measuring system.

### Введение

Современное развитие многих высокотехнологических отраслей промышленности, таких как авиационная и космическая техника, связано с исследованиями высокоскоростных газожидкостных потоков [3]. На сегодняшний день имеется острая потребность в проведении точных высокоскоростных экспериментальных измерений, и развитие высокотехнологичных прецизионных измерительных приборов является актуальным.

В работе предложено техническое решение, позволяющее расширить диапазон измеряемых скоростей и пульсаций у приборов, работающих по принципу лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС).

### Предшествующие работы

В 2002–2003 гг. в Институте теплофизики СО РАН была разработана новая анаморфотная оптоэлектронная схема 2D и 3D лазерной доплеровской измерительной

системы (ЛДИС) [2,4], позволившая применить современные мощные полупроводниковые лазеры с низкой степенью пространственной и временной когерентности, и существенно улучшившая характеристики измерительной системы. Реализована встроенная подсистема обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур «Field Programmable Gate Array». Разработана новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Созданный оптоэлектронный модуль ЛДИС имеет моноблочную конструкцию. Оптоэлектронный модуль ЛДИС содержит все элементы оптических и электронных подсистем и связывается с компьютером по стандартному сетевому каналу на основе Ethernet. За счет реализации протокола TCP компьютер может размещаться в произвольном месте (например, в другом городе), а физические эксперименты могут проводиться в дистанционном режиме.

Разработанный ранее ЛДИС ЛАД-056 [2] явился примером удачной реализации данного подхода. Однако ограничения по производительности ЭВМ типа IBM PC с частотой процессора  $2\div 3$  ГГц и канала передачи информации между процессором и ЭВМ (LAN 100 Мбит/сек) ограничил возможности прибора по измерению пульсаций исследуемых потоков частотами не более 3 кГц [1]. В первую очередь это обусловлено необходимостью передачи доплеровского сигнала в ЭВМ для вычисления скорости. Алгоритм вычисления скорости основан на комплексном адаптивном частотно-временном анализе сигнала и использует быстрое преобразование Фурье (БПФ).

С целью развития возможностей ЛДИС в сторону увеличения измеряемых скоростей и пульсационных характеристик газожидкостных потоков были проведены работы по модернизации внутренней архитектуры системы обработки данных ЛДИС.

### **Практическая реализация**

Для расширения функциональных возможностей системы обработки данных ЛДИС число каналов АЦП было увеличено до 4-х, а максимальная частота оцифровки сигналов увеличена до 250 МГц. Четыре измерительных канала позволяют реализовать 2-х координатную ЛДИС со знакопеременной скоростью и 3-х координатную ЛДИС с одной знакопеременной скоростью и двумя однополярными скоростями. Высокая частота оцифровки позволяет применять ЛДИС для измерений в высокоскоростных потоках, встречающихся, например, в авиационных или космических отраслях, где скорость может достигать 3000 км/с. При этом скорость потока оцифрованных данных из 4-х АЦП достигает значения 16 Гбит/сек. Передавать такой поток данных на обработку в ЭВМ на данном этапе развития каналов связи с ЭВМ не представляется возможным даже после возможной предварительной обработки (сжатия) информации.

Исполнение основных алгоритмов обработки доплеровского сигнала, в том числе БПФ (быстрого преобразования Фурье), реализовано внутри системы обработки данных на основе сигнального процессора. С целью получения высоких скоростей обработки применен 6-ти ядерный 32-разрядный сигнальный процессор TMS320C6472 фирмы Texas Instruments. Максимальная производительность сигнального процессора TMS320C6472 при тактовой частоте 600МГц достигает величины 28800 миллионов операций в секунду (мипс) [5] .

Структура разработанного модуля обработки приведена на рисунке 1.

Аналоговые сигналы А, В, С, D с оптико-механических модулей прибора подаются на разъём входных усилителей модуля обработки, а с него на предусилители ИС AD8369. Коэффициенты усиления усилительных каналов, независимо для каждого усилителя, управляются программой через SPI порты FPGA и входы GPIO процессора. Диапазон регулировки коэффициентов усиления равен 45 дБ.

Усиленные сигналы оцифровываются с частотой до 250МГц четырьмя 14-ти битными АЦП типа ADS62P49 (2 АЦП в 1 корпусе ИС). Оцифрованные данные под управлением автомата в FPGA (Cyclone III, ИС EP3C5F256C6) синхронно записываются в ОЗУ типа SRAM-QDR, состоящее из 2-х ИС K7R323682B (1024Кслов\*36бит). Размер памяти позволяет хранить информацию последних 512К измерений всех 4-х АЦП и коэффициенты усиления предусилителей.

Реализована возможность программно менять частоту оцифровки данных в сторону меньших частот. Это обеспечивает увеличение диапазона измерения скоростей ЛДИС.

Имеющаяся в модуле микросхема CPLD (EPM3064) обеспечивает первоначальный корректный запуск процессора, формирует необходимые частоты для субмодулей процессора, а также сигналы конфигурации и сбросов процессора.

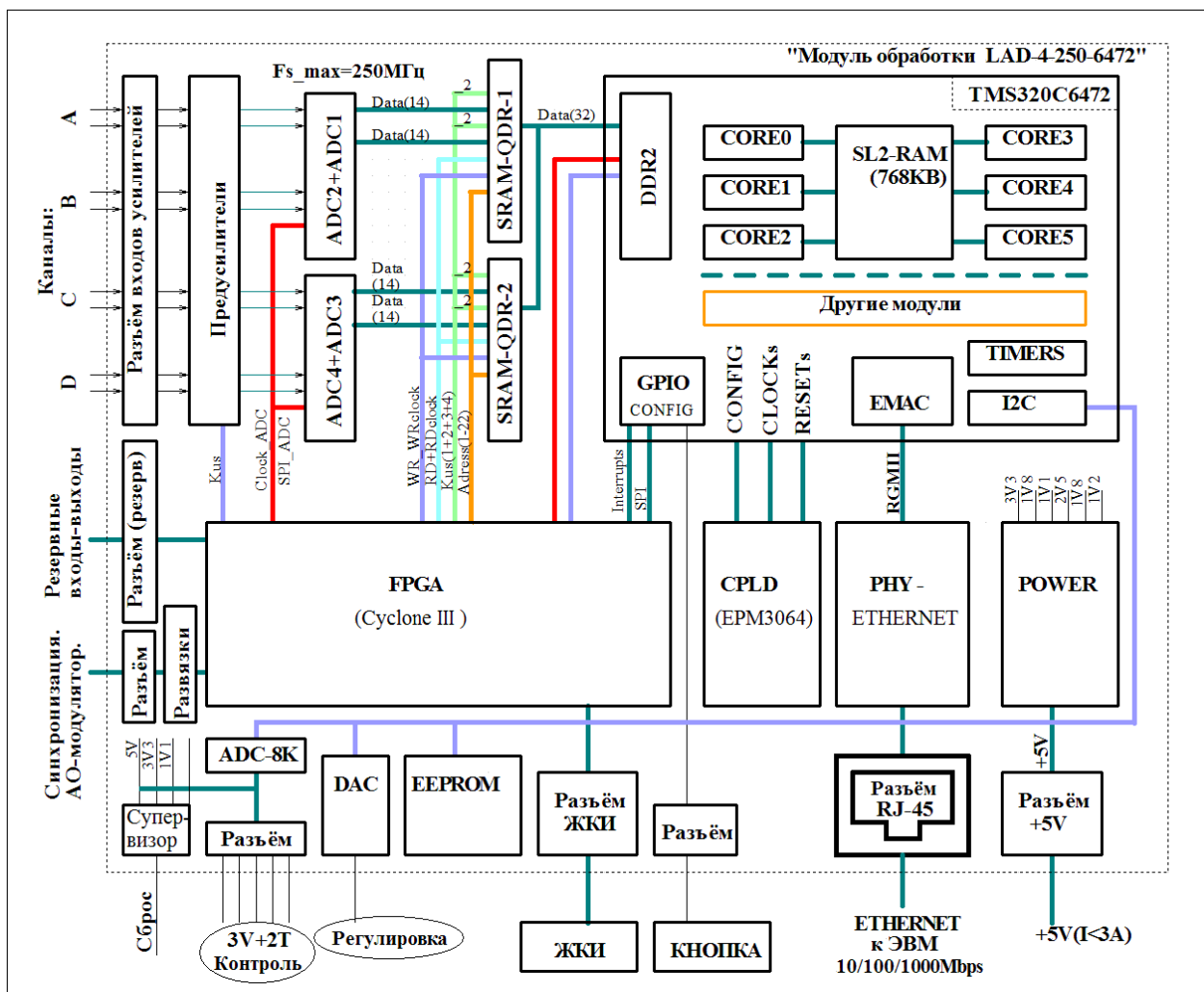


Рисунок 1. Структура модуля обработки ЛДИС

К шине I<sup>2</sup>C процессора подключены: технологический 8-ми каналный 12-ти разрядный АЦП ADC-8K для контроля напряжений и температур прибора; цифроаналоговый 12-ти разрядный преобразователь DAC, предназначенный для регулировки напряжения питания ФЭУ или лавинных диодов в приёмниках оптического излучения оптико-механических модулей; память EEPROM с программой начального загрузчика, обеспечивающего возможности загрузки проекта FPGA и основной рабочей программы через PHY-ETHERNET модем из внешней ЭВМ; резервный разъём интерфейса I<sup>2</sup>C, который позволяет, при необходимости, нарастить в приборе дополнительные малоскоростные аппаратные возможности.

На модуле имеется разъём с резервными сигналами из FPGA, которыми можно управлять от процессора, и разъём с 4-мя гальванически изолированными от основной схемы сигналами для синхронизации прибора к процессам объекта исследования.

Кнопка и ЖКИ используются только на этапе отладки рабочей программы. Управление прибором с рабочей программой, а также съём информации с прибора осуществляются от внешней ЭВМ через ETHERNET (100 или 1000Мбит/сек) по протоколу TCP/IP.

В программе модуля реализованы следующие основные алгоритмы:

- загрузки от ЭВМ в программируемую логику на ИС FPGA рабочего проекта;
- записи в прибор от ЭВМ и чтения в ЭВМ рабочих параметров;
- расчёта скоростей газожидкостных потоков по сигналам с АЦП с помощью БПФ и алгоритмов интерполяции;
- расчёт для каждого измерения критерия качества (КК);
- выдачи в непрерывном режиме обработанных результатов измерений в ЭВМ;
- оперативного управления прибором в процессе проведения экспериментов.

На основе нового разработанного модуля обработки ЛДИС разработана система обработки ЛДИС, позволяющая вычислять скорости газожидкостных потоков с частотой пульсаций до 50 кГц. На основе предложенных технических решений возможно создание ЛДИС, измеряющей в газожидкостных потоках скорости до 3000 км/с, и пульсации с частотами до 50 кГц.

### **Выводы**

Впервые предложена новая структура модуля обработки ЛДИС на основе современного высокопроизводительного 6-ти ядерного сигнального процессора TMS320C6472 и высокоскоростных АЦП ADS62P49 с частотой оцифровки сигналов до 250МГц. Разработан новый модуль обработки и программное обеспечение, позволяющие в составе ЛДИС вычислять скорости газожидкостных потоков с темпом до 100 кГц/сек. Показано, что на основе разработки возможно создание ЛДИС, измеряющей в газожидкостных потоках скорости до 3000 км/ч и пульсации с частотами до 50 кГц с высокой точностью.

### **Список литературы**

1. Главный В. Г., Бакакин Г. В., Меледин В. Г., Рахманов В. В., Садбаков О. Ю. Модуль предварительной обработки сигналов для теплофизических экспериментов // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 166-167.
2. Меледин В. Г., Аникин Ю. А. Бакакин Г. В., Главный В. Г., Двойнишников С. В., Елисеев И. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Наумов И. В., Окулов В. Л., Павлов В. А., Рахманов В. В., Садбаков О. Ю., Шархов А. С. Лазерная доплеровская измерительная система для 3D

диагностики многофазных газожидкостных потоков ЛАД 056 // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. 14-17 марта 2007, Санкт-Петербург, Россия / Под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко, В. Ф. Самохина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 110-114.

3. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии. – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2008. – 75 с.

4. Рахманов В. В., Аникин Ю. А., Двойнишников С. В., Кабардин И. К., Наумов И. В., Садбаков О. С. Особенности ЛДА-измерений в натуральных гидродинамических экспериментах // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.3: Сборник трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 27–29.04.2011, Санкт-Петербург, Россия // Под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.196-198.

5. Техническое описание сигнального процессора TMS320C6472. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/sprs612g/sprs612g.pdf> (дата обращения 01.04.2013).

#### **Рецензенты:**

Бердников Владимир Степанович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав.лабораторией, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Лежнин Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, г.н.с., Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.