

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.15>

УДК: УДК 621.317.7, 543.422

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

А.В. Крючков<sup>1</sup>, М.П. Герасимова<sup>1</sup>, А.А. Маркова<sup>1</sup>, С.А. Садовников<sup>1</sup>,  
В.В. Филатов<sup>1</sup>, С.В. Яковлев<sup>1</sup>, О.А. Романовский<sup>1</sup>, Ю.В. Кистенев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН,  
634055, Томск, площадь Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Томск, проспект Ленина, 36

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2026 г.

**Аннотация.** Настоящая статья посвящена разработке и технической реализации прецизионных программно-аппаратных средств, предназначенных для дистанционного оперативного мониторинга концентрации диоксида углерода в открытых атмосферных трактах. В работе детально обосновывается архитектура гетерогенного измерительного комплекса, функционирующего на принципах совмещения диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии (TDLAS) и методов прямой регистрации поглощения (DAS). Теоретический базис исследования опирается на закон Бугера-Ламберта-Бера и математической аппроксимации контура линии поглощения через сверточный профиль Фойгта, для минимизации систематических погрешностей, обусловленных флуктуациями термодинамических параметров среды. Данный подход позволяет в автоматизированном режиме разделять вклады лоренцевского и доплеровского механизмов уширения, что является критически важным условием для корректного восстановления концентрации CO<sub>2</sub> в условиях переменного атмосферного давления. Аппаратная часть системы реализована на базе встраиваемой платформы Red Pitaya, использующей вычислительные ресурсы программируемой логической

интегральной схемы (ПЛИС) Xilinx Zynq. В цифровом домене ПЛИС реализованы модули прямого цифрового синтеза (DDS) для формирования прецизионной линейной развертки тока накачки перестраиваемого диодного лазера, а также высокоскоростные конвейерные алгоритмы когерентного накопления и цифрового усреднения данных. Интеграция данных узлов непосредственно в логику ПЛИС позволила достичь существенного улучшения отношения сигнал/шум (SNR) даже в условиях интенсивной атмосферной турбулентности и значительных амплитудных искажений на измерительной трассе. Разработанный комплекс обеспечивает решение обратной задачи спектроскопии в режиме жесткого реального времени, гарантируя высокую точность и повторяемость результатов экологического зондирования. Применение методов детерминированной обработки сигналов на кристалле в сочетании с прецизионными спектрометрическими моделями делает данную разработку перспективным решением для создания компактных систем лидарного типа. Такие системы востребованы для мониторинга антропогенных выбросов и глобального контроля газового состава тропосферы с субсекундным временным разрешением, полностью отвечая современным требованиям радиоэлектронного приборостроения в области высокотехнологичного экологического приборостроения.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, углекислый газ, TDLAS, DAS, ПЛИС, Red Pitaya, спектроскопия поглощения, экологический мониторинг.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024 г.).

**Автор для переписки:** Крючков Александр Владимирович, [kaw@iao.ru](mailto:kaw@iao.ru)

## Введение

Мониторинг концентрации парниковых газов, в частности диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , является одной из приоритетных задач глобальной системы экологического контроля [1-4]. Постоянно растущие требования к точности, мобильности и скорости работы газоаналитических систем обуславливают переход от громоздких лабораторных приборов к компактным программно-

аппаратным комплексам дистанционного зондирования. Среди существующих методов оптического детектирования одним из наиболее перспективных считается метод диодной лазерной абсорбционной спектроскопии (TDLAS) [5]. Его фундаментальная вариация – спектроскопия прямого поглощения (Direct Absorption Spectroscopy, DAS [6]) – обеспечивает высокую стабильность измерений и прямую прослеживаемость к эталонным спектроскопическим данным без необходимости калибровки с применением поверочных газовых смесей, в отличие от спектроскопии с модуляцией длины волны WMS (Wavelength Modulation Spectroscopy) [7]. Использование узкополосных перестраиваемых лазерных диодов позволяет селективно выделять линии поглощения  $\text{CO}_2$ , минимизируя влияние мешающих факторов, таких как пары воды или атмосферная запыленность [8]. Однако реализация высокой чувствительности метода DAS требует прецизионного управления параметрами излучения лазера и высокоскоростной обработки сигналов [9]. В современных разработках решение этих задач возлагается на программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Применение платформ на базе систем на кристалле (SoC), таких как Red Pitaya [10], позволяет интегрировать генерацию сложных управляющих сигналов и цифровую фильтрацию данных в едином устройстве. Настоящая работа посвящена описанию программно-аппаратного комплекса для зондирования  $\text{CO}_2$ . В статье рассматривается математический аппарат спектроскопии DAS, особенности аппроксимации спектральных контуров, а также архитектура блоков ПЛИС, обеспечивающих функционирование измерительного тракта в режиме реального времени.

## **1. Теоретические основы метода и математическая модель тракта регистрации сигналов TDLAS-DAS**

Метод диодной лазерной абсорбционной спектроскопии (TDLAS) базируется на прецизионном управлении частотой излучения полупроводникового лазера для сканирования индивидуальных колебательно-вращательных линий поглощения молекул диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). В конфигурации прямой

абсорбционной спектроскопии (Direct Absorption Spectroscopy, DAS) регистрация спектра осуществляется путем линейной перестройки частоты лазера в спектральной области анализируемой линии поглощения.

Выбор метода DAS в рамках данной разработки обусловлен его высокой эффективностью при реализации на цифровых вычислительных платформах. В отличие от модуляционных методов, требующих сложной процедуры фазовой синхронизации и демодуляции гармоник, метод DAS позволяет осуществлять прямую оцифровку информативного сигнала непосредственно с выхода фотоприемного устройства. Такой подход исключает необходимость использования внешних аналоговых или цифровых синхронных детекторов, что существенно упрощает архитектуру аппаратной части на базе ПЛИС и снижает энергопотребление системы [11].

Процесс трансформации оптического сигнала в газовом тракте описывается законом Бугера-Ламберта-Бера. Для цифровой обработки сигналов интенсивность излучения  $I(\nu)$ , зарегистрированная после прохождения через слой газа длиной  $L$ , представляется в виде [9]:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \cdot \exp[-S(T) \cdot \phi(\nu - \nu_0) \cdot N \cdot L],$$

где  $I(\nu)$  – зарегистрированная интенсивность излучения на выходе измерительного тракта;  $I_0(\nu)$  – интенсивность зондирующего излучения лазера (базовая линия), аппроксимируемая полиномом;  $S(T)$  – интенсивность линии поглощения при температуре  $T$  (см/молекула);  $\phi(\nu - \nu_0)$  – нормированная функция профиля линии;  $N$  – объемная концентрация молекул диоксида углерода (молекул/см<sup>3</sup>);  $L$  – дистанция зондирования (см). Ключевым параметром для системы обработки является безразмерная спектральная оптическая плотность  $\alpha(\nu)$ , извлекаемая из логарифмического отношения оцифрованных сигналов:

$$\alpha(\nu) = \ln(I_0(\nu)/I(\nu)) = S(T) \cdot \phi(\nu - \nu_0) \cdot N \cdot L.$$

Для минимизации влияния инструментальных шумов и нестабильности мощности лазерного диода расчет концентрации  $N$  в современных программно-аппаратных комплексах принято производить через интегральное поглощение (площадь спектрального пика):

$$N = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(\nu) d\nu}{S(T) \cdot L}.$$

Функция профиля  $\phi(\nu)$  моделируется контуром Фойгта, учитывающим доплеровское  $\gamma_D$  и столкновительное уширение. Величина  $\gamma_D$  определяется тепловой скоростью молекул:

$$\gamma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln(2) k_B T}{M}},$$

где  $k_B$  – константа Больцмана;  $c$  – скорость света;  $M$  – молекулярная масса.

В радиоэлектронных системах на базе ПЛИС (например, платформа Red Pitaya) для аппроксимации данного профиля в реальном времени могут быть применены оптимизированные вычислительные алгоритмы, позволяющие восстанавливать параметры линии без использования ресурсоемких операций с плавающей запятой.

## 2. Аппаратная реализация измерительного комплекса

Техническая реализация системы дистанционного зондирования  $\text{CO}_2$  базируется на модульной архитектуре, объединяющей прецизионную оптоэлектронную часть, блоки управления лазерным излучением и цифровую платформу обработки сигналов. Основной задачей аппаратного комплекса является обеспечение высокой стабильности спектральных характеристик лазерного источника и минимизация шумов в измерительном тракте регистрации.

В качестве первичного источника зондирующего излучения применен лазерный диод с распределенной обратной связью (DFB) производства компании ЛАЗЕРСКОМ (Беларусь). Излучатель генерирует одночастотное излучение со спектральной шириной линии менее 500 кГц, что на два порядка меньше полуширины аналитических линий поглощения углекислого газа при атмосферном давлении. Для прецизионного управления параметрами лазерного диода применен специализированный программно-аппаратный стек производства компании Лазерная техника и технологии (Беларусь). Система включает в себя два ключевых модуля:

Драйвер тока накачки серии TLD, обладающий ультранизким уровнем собственных шумов. Он обеспечивает возможность внешней аналоговой модуляции тока для формирования высоколинейного пилообразного сканирования частоты лазера.

Контроллер Пельтье серии РТВ, реализующий замкнутый контур управления на основе ПИД-регулятора. Модуль обеспечивает поддержание температуры лазерного кристалла с точностью до  $10^{-3}$  К, что критически важно для исключения спектрального дрейфа аналитической линии и фиксации центральной частоты зондирования.

Центральным звеном цифровой обработки данных является программно-определяемая платформа Red Pitaya (модель STEMlab 125-14), функционирующая на базе системы на кристалле (SoC) Xilinx Zynq 7010. Основные технические параметры платформы, важные для характеристик комплекса, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные технические параметры STEMlab 125-14.

Параметр	Значение	Назначение в системе TDLAS
SoC (Система на кристалле)	Xilinx Zynq 7010	Интеграция ПЛИС-логики (DSP) и ARM-процессора
Разрядность АЦП / ЦАП	14 бит	Обеспечение точности регистрации формы линии
Частота дискретизации	125 Мвыб/с	Оцифровка сигналов в реальном времени
Количество входов/выходов	2 вх. / 2 вых.	Управление драйвером и прием сигнала с детектора
Входной диапазон АЦП	$\pm 1$ В / $\pm 20$ В	Согласование с уровнями сигналов фотоприемника
Оперативная память	512 МБ DDR3	Хранение массивов данных для постобработки в ARM

Благодаря жесткой синхронизации ресурсов ПЛИС, запуск генерации пилообразного напряжения на ЦАП и старт захвата данных на АЦП происходят с детерминированной задержкой в один такт (8 нс). Это позволяет реализовать алгоритмы когерентного усреднения сигналов непосредственно в логической фабрике FPGA, что значительно повышает отношение сигнал/шум перед выполнением процедуры аппроксимации спектрального контура. Прямая оцифровка информативного сигнала методом DAS исключает необходимость использования внешних синхронных детекторов, что упрощает общую архитектуру системы и снижает ее энергопотребление.

Интеграция описанных компонентов в единую систему с использованием волоконно-оптических интерфейсов позволила создать компактный и виброустойчивый комплекс. Использование защищенных соединений между лазером, драйверами, фотоприемником и вычислительным модулем высокую надежность системы в полевых условиях. На рис. 1 представлен общий вид разработанного программно-аппаратного комплекса с указанием расположения основных функциональных узлов.

Для создания несущего корпуса системы использовался конструкционный профиль Соберизавод (Москва). Крепление основных элементов системы к несущему корпусу осуществлялся с применением дюралюминиевой и жестяной платформ через Т-болты. С целью ускорения юстировки инфракрасное излучение лазерного диода LDS-1570-DFB-2.5G-15 (Laserscom) смешивалось с видимым

излучением лазерного диода LDS-639-FP-60 (Laserscom) с применением волоконных делителей TW1550R1A1 (Thorlabs). Часть ИК-излучения отводилась к фотодетектору №1 (Laserscom) для регистрации опорных сигналов. Далее излучение выводилось в атмосферу коллиматором с волоконно-оптическим вводом на основе внеосевого параболического зеркала RC08APC-P01 (Thorlabs). После рассеяния от топографических целей или отражения от зеркального ретрорефлектора излучение собиралось телескопом Ньютона SkyWatcher (F = 800 мм), отклонялось эллиптическим зеркалом PFE10-P01 (Thorlabs), установленным в кинематический держатель KM100 (Thorlabs) в направлении фотодиода DET10C2 (Thorlabs). Оптическое излучение преобразовывалось в электрические сигналы, которые поступали на вход трансимпедансного усилителя AMP102 (Thorlabs) и, далее на вход ПЛИС Red Pitaya.

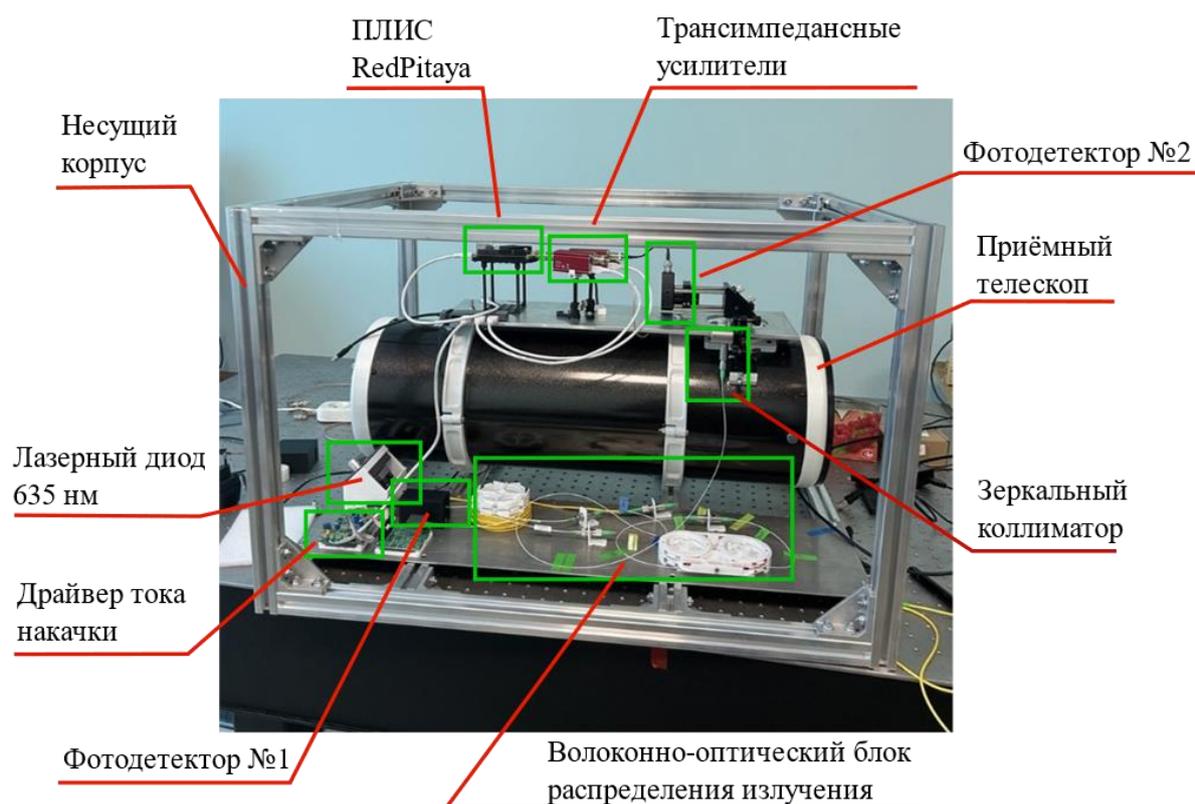


Рис. 1. Общий вид разработанной системы.

Такая компоновка, сочетающая высокостабильную оптоэлектронику с мощными вычислительными ресурсами Red Pitaya, позволяет реализовать портативный газоанализатор CO<sub>2</sub> с минимальными массогабаритными характеристиками и лабораторной точностью измерений.

### 3. Алгоритм обработки сигналов и аппаратная логика измерительного тракта

Эффективность прецизионного дистанционного зондирования CO<sub>2</sub> методом прямой абсорбционной спектроскопии (DAS) определяется временной детерминированностью процессов формирования зондирующего излучения и регистрации аналитического отклика. В представленной разработке архитектура измерительного тракта базируется на использовании системы на кристалле (SoC) Zynq-7010 платформы Red Pitaya. Ключевая особенность реализации заключается в переносе ресурсоемких операций первичной обработки сигналов в аппаратную логику ПЛИС (FPGA), что позволяет обрабатывать потоки данных в реальном времени на частоте дискретизации 125 МГц. Функциональная организация системы на уровне аппаратных дескрипторов (HDL) представлена на блок-схеме (рис. 2).

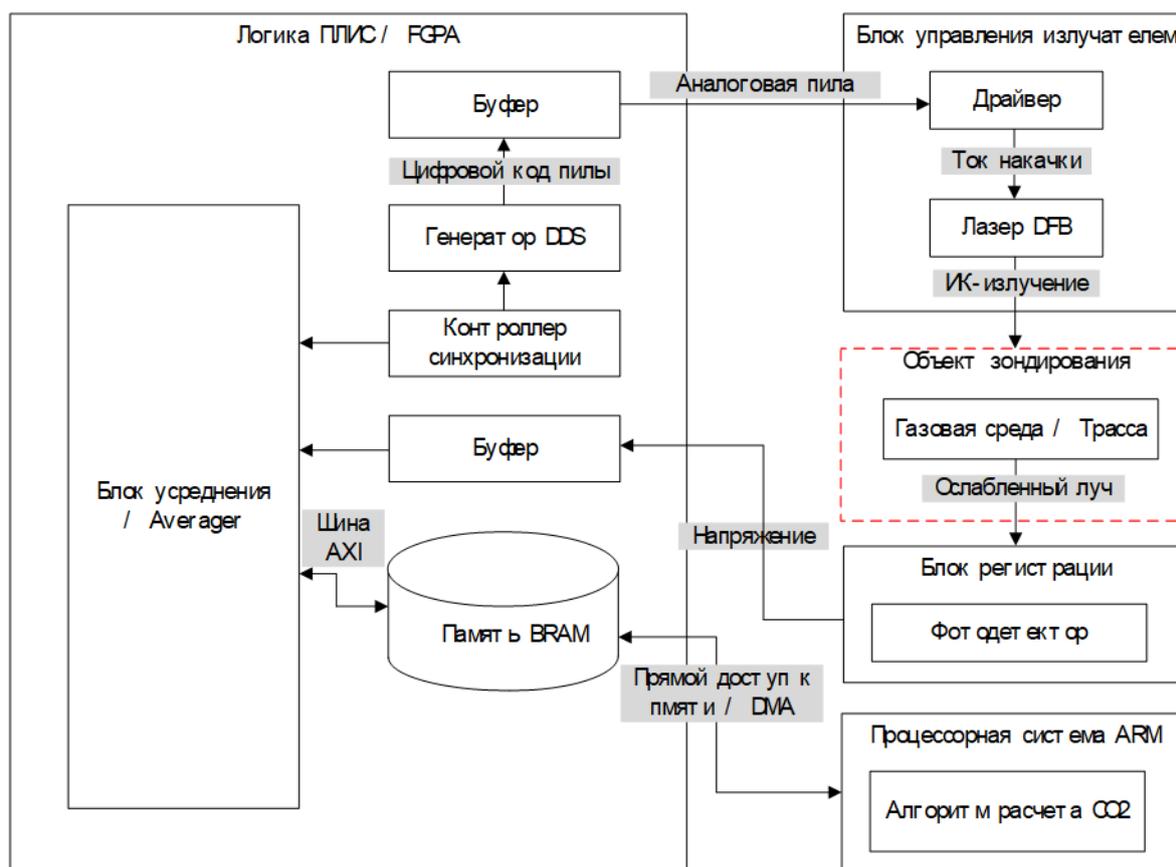


Рис. 2. Функциональная блок-схема цифрового измерительного тракта.

Центральным узлом домена синтеза является модуль прямого цифрового синтеза (DDS), формирующий управляющую кодовую последовательность для

ЦАП. Генератор DDS обеспечивает высоколинейную пилообразную модуляцию тока накачки DFB-лазера через драйвер. Линейность формируемой развертки определяет стабильность частотной шкалы волновых чисел, необходимую для корректного восстановления профиля линии поглощения.

Циклограмма функционирования узлов системы базируется на жесткой привязке всех процессов к системному тактовому сигналу. Работа комплекса организована в виде повторяющихся циклов сканирования длительностью  $T_{scan}$ , каждый из которых включает фазу активного измерения  $T_{meas}$  и фазу релаксации. В течение временного окна  $T_{meas}$  осуществляется линейное нарастание кода синтезатора и синхронная активация триггера АЦП, разрешающего захват отсчетов интенсивности  $I(\nu)$ . Фаза релаксации необходима для стабилизации теплового режима кристалла лазера и подготовки следующего цикла сканирования. Оцифрованный поток данных с 14-битного АЦП поступает в блок когерентного усреднения, реализованный на базе двухпортовой блочной памяти. Алгоритм накопления описывается выражением:

$$Y[k] = \sum_{i=1}^N X_i[k],$$

где  $X_i[k]$  –  $k$ -й цифровой отсчет в  $i$ -м цикле сканирования, а  $N$  – глубина накопления (типовое значение  $N = 1024$ ). Техническая реализация накопления позволяет суммировать текущий отсчет с результатом предыдущих циклов за один такт системной частоты, что обеспечивает эффективную цифровую фильтрацию и подавление шумов квантования. Прямое детектирование методом DAS исключает необходимость аппаратной реализации фазовой автоподстройки и синхронных детекторов, что минимизирует использование логических ячеек и снижает энергопотребление кристалла. После завершения пачки из  $N$  циклов формируется прерывание для процессорной системы ARM. Программная часть алгоритма выполняет аппроксимацию базовой линии  $I_0(\nu)$  полиномом Чебышева и логарифмическое преобразование нормализованного сигнала для получения спектра оптической плотности  $\alpha(\nu)$ . Финальная стадия

обработки заключается в нелинейной регрессии экспериментальных данных теоретическим профилем Фойгта, что позволяет рассчитать абсолютную концентрацию углекислого газа на основе интегральной площади восстановленного контура.

Такая гибридная архитектура обеспечивает частоту обновления данных до 20 Гц при сохранении спектроскопической точности измерений.

#### **4. Результаты зондирования и восстановления концентрации углекислого газа в атмосфере**

Для проведения экспериментов по восстановлению концентрации  $\text{CO}_2$  был выбран Базовый экспериментальный комплекс (БЭК) ИОА СО РАН проведены испытания комплекса для измерения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. БЭК оборудован высокоточным калиброванным газоанализатором LI-COR LI-820 (с погрешностью измерений  $<0,2 \text{ млн}^{-1}$ ), который выступал в качестве референтного значения исследуемой величины. Калибровка газоанализатора регулярно производится с применением поверочных газовых смесей.

Климатические условия проведения испытаний соответствовали лету средних евразийских широт, температуре окружающей среды  $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительной влажности воздуха  $32,4 \%$ . Метеоданные зарегистрированы приборами на высоте 10 м, установленные на мачте, расположенной в месте проведения измерений. Разработанный комплекс был расположен в оборудованном КУНГе, а на удалении от него с использованием телескопической мачты был смонтирован уголкового отражатель (ретрорефлектор) на высоту  $\sim 1 \text{ м}$  от поверхности земли.

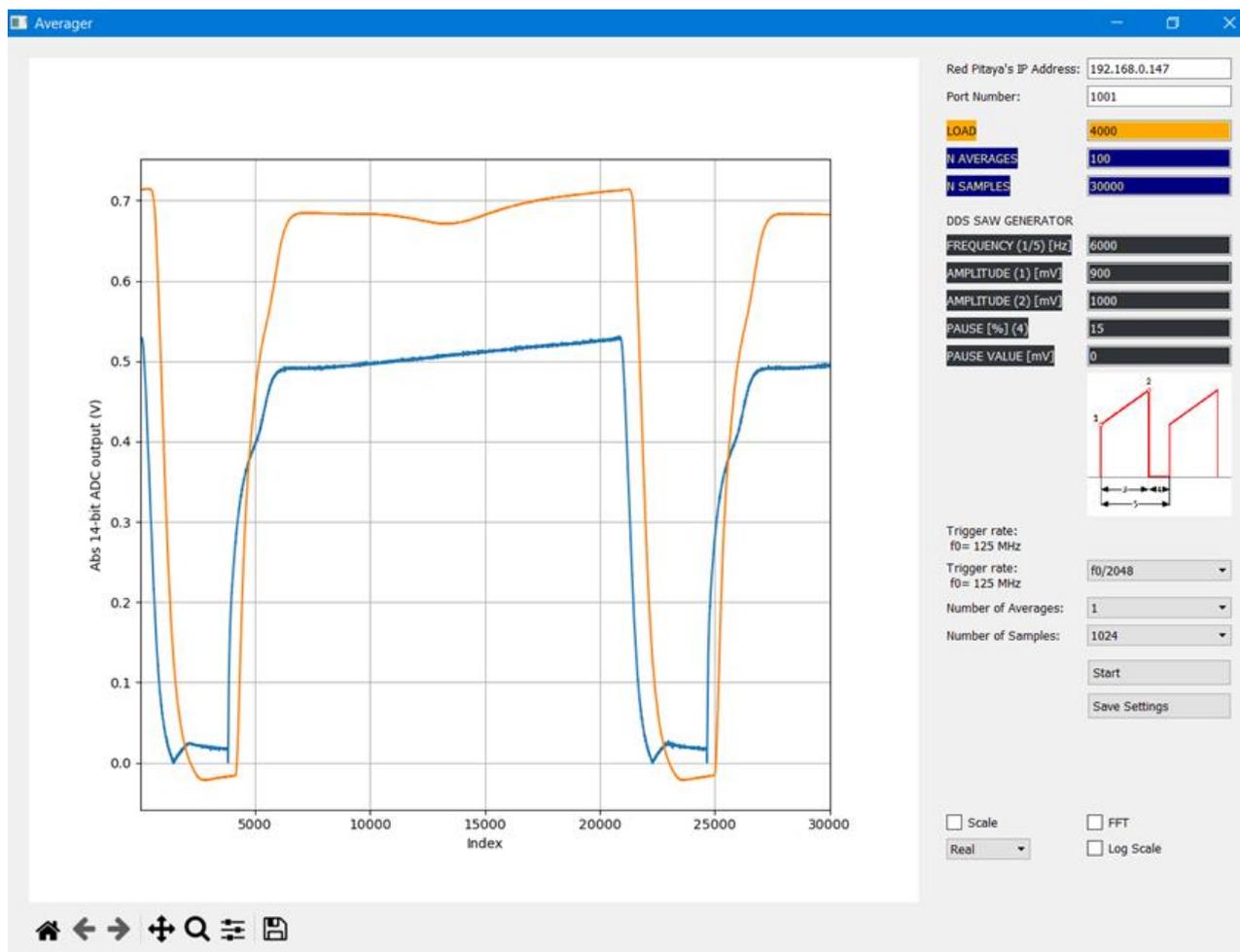


Рис. 3. Интерфейс программы управления ПЛИС RedPitaya и зарегистрированные лидарные сигналы (желтая кривая – информативный сигнал, синяя кривая – опорный сигнал).

Длина трассы зондирования составляла порядка 323 м. Протяженность трассы измерялась по спадающим фронтам опорного и информативного сигнала. Частота повторения импульсов в ходе данных экспериментов составляло 6 кГц, количество импульсов усреднения – 100.

С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса и зарегистрированных сигналов была восстановлена концентрация  $\text{CO}_2$ , которая составила 451,03 ppm, при этом локальный газоанализатор с почасовым усреднением данных измерил концентрацию  $\text{CO}_2$  на уровне 424,85 ppm – то есть абсолютная разница достигает ~5.8 %.

## Заключение

Таким образом, в результате проведенных работ разработан и апробирован программно-аппаратный комплекс для дистанционного зондирования диоксида углерода CO<sub>2</sub>, объединяющий прецизионные оптические компоненты и современные средства цифровой обработки сигналов. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Реализована эффективная аппаратная интеграция диодного DFB-лазера и прецизионных модулей управления. Использование высокостабильных драйверов тока и контроллеров температуры обеспечило фиксацию аналитической линии поглощения с точностью до  $10^{-3}$ К.

2) Продемонстрирована высокая производительность измерительного тракта на базе ПЛИС Red Pitaya. Применение архитектуры SoC Zynq-7010 позволило перенести первичную обработку данных в аппаратную логику, обеспечив частоту дискретизации 125 МГц и когерентное усреднение сигналов в реальном времени.

3) Обосновано преимущество метода прямой оцифровки DAS. Отказ от внешних синхронных детекторов (Lock-in) в пользу прямой программно-аппаратной регистрации спектра позволил существенно упростить архитектуру вычислительных узлов ПЛИС, минимизировать аппаратные задержки и снизить общее энергопотребление системы.

4) Разработанные программно-аппаратные средства обеспечивают частоту обновления данных до 20 Гц при сохранении спектроскопической точности, что делает комплекс перспективным решением для создания автономных сетей дистанционного экологического мониторинга атмосферы.

На основе полученных результатов определены следующие направления развития программно-аппаратного комплекса:

1) Интеллектуализация алгоритмов обработки данных. Перспективным направлением является внедрение в ПЛИС-часть системы специализированных нейросетевых ядер (NPU) для ускоренной нелинейной регрессии спектральных контуров. Это позволит перейти от стандартной аппроксимации методом

наименьших квадратов к интеллектуальному распознаванию образов линий поглощения в условиях экстремального уровня шумов и нестационарности базовой линии.

2) Мультигазовый мониторинг. Архитектура на базе Red Pitaya обладает избыточностью ресурсов, что позволяет реализовать многоканальное управление несколькими лазерными источниками. Дальнейшие работы будут направлены на расширение спектра детектируемых газов (метан, оксиды азота) в едином измерительном цикле путем мультиплексирования сигналов во временной или частотной области.

3) Повышение автономности и сетевая интеграция. Полученные в ходе проведения работ результаты могут лечь в основу при разработке мобильной версии комплекса с низким энергопотреблением для установки на беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Реализация протокола передачи данных 5G/6G в процессорной части ARM позволит интегрировать сенсоры в глобальные распределенные сети мониторинга парниковых газов (IoT Sensing) с облачной обработкой результатов в реальном времени.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024 г.).

### Литература

1. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы / С.М. Бобровников, Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский, [и др.]. – Томск : ИОА СО РАН, 2014. – 508 с.
2. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размоллов А.А. Влияние континуального поглощения паров воды на радиационный форсинг углекислого газа в атмосфере для региона Нижнего Поволжья. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12. С. 1029–1035. <http://doi.org/10.15372/AOO20221210>.
3. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размоллов А.А. Влияние вариаций общего содержания паров воды на радиационный форсинг углекислого газа и метана в тропосфере и стратосфере. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 07. С. 594–601. <http://doi.org/10.15372/AOO20240708>.

4. Молекулярная спектроскопическая база данных HITRAN [сайт]. – <http://www.hitran.org> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
5. Lackner M. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in the process industries—a review // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2007. – Vol. 23. – No. 2. – P. 65-147. <http://doi.org/10.1515/REVCE.2007.23.2.65>.
6. Ono S. et al. Measurement of a doubly substituted methane isotopologue,  $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ , by tunable infrared laser direct absorption spectroscopy // *Analytical Chemistry*. – 2014. – Vol. 86. – No. 13. – PP. 6487-6494. <http://doi.org/10.1021/ac5010579>.
7. Rieker G.B., Jeffries J.B., Hanson R.K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments // *Applied optics*. – 2009. – Vol. 48. – No. 29. – PP. 5546-5560. <http://doi.org/10.1364/AO.48.005546>.
8. Measures, R.M. *Laser remote sensing: Fundamentals and applications* / R.M. Measures. – New York : Wiley-Interscience, 1984. – 521 p.
9. Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Поберовский А. В. Сравнения измерений стратосферного содержания  $\text{CO}_2$  наземным и спутниковым методами. // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 03. С. 191–194. <http://doi.org/10.15372/AOO20220303>.
10. Platt, U. *Differential optical absorption spectroscopy* / U. Platt, J. Stutz. – Berlin : Springer-Verlag, 2008. – 597 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-75776-4>.
11. Red Pitaya Hardware User Manual // *Red Pitaya Documentation* : [сайт]. – <http://redpitaya.readthedocs.io> (дата обращения: 22.01.2026). – Текст: электронный.

**Для цитирования:**

Крючков А.В., Герасимова М.П., Маркова А.А., Садовников С.А., Филатов В.В., Яковлев С.В., Романовский О.А., Кистенев Ю.В. Программно-аппаратные средства дистанционного зондирования углекислого газа в атмосфере. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.15>