

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Космических и информационных технологий

институт

Вычислительная техника

Кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ О.В. Непомнящий

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Комплекс дистанционного лидарного зондирования для определения  
предельно низких концентраций метана»

тема

09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»

код и наименование направления

09.04.01.06 «Микропроцессорные системы»

код и наименование магистерской программы

Научный  
руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

зав.каф.ВТ, профессор,  
канд.тех.наук, доцент  
должность, ученая степень

Непомнящий О.В.  
инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Лещенко С.Л.  
инициалы, фамилия

Рецензент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Гл. спец. отд. РИНТ  
ООО «РН-  
КрасноярскНИПИнефть»  
должность, ученая степень

Ледяев А.И.  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

зав.каф.ВТ, профессор,  
канд.тех.наук, доцент  
должность, ученая степень

Непомнящий О.В.  
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Космических и информационных технологий  
институт  
Вычислительная техника  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ О. В. Непомнящий  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме \_\_\_\_\_ магистерской диссертации**

Студенту Лещенко Светлане Леонидовне

фамилия, имя, отчество

Группа КИ18-01-6М Направление (специальность) 09.04.01

номер

код

«Информатика и вычислительная техника»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Комплекс дистанционного лидарного зондирования для определения предельно низких концентраций метана»

Утверждена приказом по университету № 19249/с от 21.12.2018

Руководитель ВКР Непомнящий О.В. профессор, зав. кафедры ВТ ИКИТ СФУ, канд.техн.наук

инициалы, фамилия, должность, ученое звание

Исходные данные для ВКР Исследование, моделирование и прототипирование технических решений для создания модели авиационного лидара, предназначенного для обнаружения предельно малых концентраций низших октанов в приземном слое.

Перечень разделов ВКР Реферат, Введение, Анализ объекта исследования и постановка задачи, Разработка математической модели, Проектирование прототипа аппаратной части лидара, Разработка тестового лабораторного макета, Заключение, Список используемых источников.

Перечень графического материала Листинг кода программы Matlab, Перечень элементов блока усиления, Чертеж схемы аппаратуры.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_   
подпись

О.В. Непомнящий

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_   
подпись

С.Л. Лещенко

инициалы, фамилия

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа магистра по теме «Комплекс дистанционного лидарного зондирования для определения предельно низких концентраций метана» содержит в себе 98 страниц текстового документа, 37 использованных источников, 56 иллюстраций, 10 таблиц и 6 приложений.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ЛИДАР, ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, МОДЕЛЬ, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС, ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ.

**Цель работы:** исследование, моделирование и прототипирование технических решений для создания модели авиационного лидара, предназначенного для обнаружения предельно малых концентраций низших октанов в приземном слое.

Документ содержит предварительные исследования предметной области, описание обоснований разработки, результаты построения математической модели излучения лидара, описание схем и алгоритмов функционирования, результаты практического моделирования и макетирования для реализации модулей приемника лазерного излучения.

Полученные в процессе дипломного проектирования результаты предназначены для проведения комплексного исследования и разработки экспериментальной установки авиационного лидара применяемого для определения предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое.

# Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Анализ объекта исследования и постановка задачи .....	8
1.1 Дистанционное зондирование Земли.....	8
1.2 Спектры излучения Солнца и Земли.....	10
1.3 Базы данных атмосферного состава.....	14
1.4 Лидар. Существующие аналоги. Результаты патентного исследования.....	17
1.4.1 «Обзор-2».....	17
1.4.2 Лазерный газоанализатор «ЛГАУ-02».....	20
1.4.3 Лидар дифференциального поглощения.....	26
1.5 Выводы по главе .....	29
2 Разработка математической модели трассы .....	31
2.1 Лидарное уравнение .....	31
2.2 Разработка модели и отработка трассы в программном обеспечении Matlab.....	34
2.3 Выводы по главе .....	43
3 Проектирование аппаратной части лидара .....	45
3.1 Устройство и принципы функционирования системы .....	46
3.2 Структурная схема приемного устройства .....	50
3.3 Модель приемного устройства .....	51
3.3.1 Выбор датчика.....	53
3.3.2 Результаты анализа .....	64
3.4 Модель аппаратуры приемного тракта.....	69
3.5 Выводы по главе .....	76
4 Разработка тестового лабораторного демонстратора .....	78
4.1 Сбор и тестирование макетов приемной аппаратуры .....	78
4.2 Выводы по главе .....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	84
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	92

ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	98

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Аэрокосмические исследования являются одним из наиболее перспективных среди известных методов дистанционного зондирования атмосферы в приземных слоях, направленных на поиск и обнаружение залежей нефти и природного газа, либо оценку загрязненности воздуха в городских условиях. Такие исследования обычно основываются на использовании технологий радиолокационного и/или лазерного зондирования атмосферного состава. Появляющиеся тенденции развития перспективных направлений геофизических исследований земной поверхности определяют новые требования и условия к точности и оперативности информации необходимой для локализации предполагаемых мест выхода углеводородов на земную поверхность. Так, наиболее перспективным в технологическом плане и наименее затратным в экономическом, следует считать обнаружение поверхностных утечек природного газа методом дистанционного лидарного зондирования приземного слоя с целью наблюдения за аэрозолем. [1]

Применение такого метода для исследований в георазведке позволит выявлять области с повышенным содержанием взвешенных веществ в атмосфере. Что позволит фиксировать локальные выходы природного газа, а также наблюдать пространственную динамику поверхностных утечек в реальном масштабе времени, осуществлять топографическую привязку предполагаемых месторождений к местности и др. [2] Кроме того, обнаружение утечек и повышенной концентрации метана позволит заблаговременно реализовать комплекс мероприятий направленных на предотвращение экологических катастроф.

Теория и практика лидарного зондирования довольно широко распространена. Исследованиям аэрозолей, утечек газа, пространственного распределения атмосферных газов (озон, кислород) и загрязняющих веществ, взвешенных в атмосфере, посвящены работы Бубличенко И.А. [3-5], Зуева

В.Е. [6-10], Шеманина В.Г. [11] и Привалова В.Е. [11-12] и др. Лазерно-локационные методы в сочетании с методами цифровой аэрофотосъёмки в течение последних лет активно применяются для решения топографических задач, в том числе и в нашей стране. Однако в известных работах (Приложение Е) практически отсутствуют результаты о готовых методиках лидарного авиационного зондирования, локализации и топографической привязки к местности предполагаемых областей концентрации с высокой точностью. Одной из проблем, встающих при реализации метода, является проблема адекватного математического представления трассы лидара, позволяющей выявлять малые концентрации природного газа не только в верхних слоях атмосферы, но и в приземном слое. Не менее важной задачей является разработка интегрированного программно-аппаратного комплекса, позволяющего осуществлять мониторинг земной поверхности с одновременной картографической привязкой. Установленный на базе разведывательного летательного аппарата, такой комплекс может выявлять локальные области распространения метана на поверхности земли, что позволило бы с высокой точностью осуществлять дальнейшие поисковые мероприятия в исследуемых районах при геолого-поисковых мероприятиях или оперативно получать информацию об изменении предельных значений концентрации газа в условиях мегаполисов [13].

Таким образом, актуальным является разработка методик и алгоритмов, а так же программно-аппаратного комплекса дистанционного, авиационного зондирования атмосферы применяющегося для обнаружения поверхностных утечек природного газа и картографической привязки, с целью выявления и адекватного геофизического представления предполагаемых скоплений газа.

**Цель диссертационной работы:** исследование, моделирование и макетирование технических решений для создания прототипа авиационного лидара, предназначенного для обнаружения предельно малых концентраций низших октанов в приземном слое.



Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

- Исследовать методы дистанционного зондирования;
- Исследовать существующие аналоги газоанализаторов;
- Провести патентное исследование;
- Разработать математическую модель трассы светового пучка лидара, определить метрики для анализа и выполнить моделирование;
- Выполнить анализ полученных результатов моделирования и определить критические параметры для аппаратной реализации;
- Разработать принцип функционирования и архитектуру программно-аппаратного комплекса для дистанционного зондирования земли;
- Изготовить и выполнить отработку функциональных узлов лидара в лабораторных условиях (приемное устройство, система обработки сигнала).

#### **Результаты, выносимые на защиту.**

- Математическая модель приемного тракта, позволяющая осуществлять интегрированный учет данных при анализе результатов замера;
- Алгоритмы управления лазерной установкой и обработки полученных информационных сигналов в соответствии с предложенным методом;
- Экспериментальный вариант лабораторной установки — аппаратно-программный комплекс лазерного, авиационного зондирования земной поверхности.

#### **Научная новизна** исследования заключается:

- В разработанной математической модели приемного тракта, базирующейся на лидарном уравнении, позволяющей осуществлять интегрированный учет данных при анализе трассы замера;
- В предложенной методике проведения замеров концентрации метана в атмосфере системой дистанционного лазерного зондирования на трассах до 150 м, основанной на принципе резонансного поглощения лазерного

излучения на селективных частотах исследуемым газом, позволяющей осуществлять определение предельно малых концентраций метана.

**Практическая ценность работы** заключается в проектировании микропроцессорной системы управления лазерной установкой, разработке лабораторного макета программно-аппаратного комплекса, реализующего на практике метод дистанционной количественной экспресс-оценки наличия углеводородов в атмосфере и позволяющего оперативно оценить их уровень с точностью до единиц ppm на трассах от 50 до 150 м.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований и выполненных работ опубликовано 11 печатных работ (Приложение Г), получено свидетельство о регистрации программного обеспечения для ЭВМ (Приложение Д).

## **1 Анализ объекта исследования и постановка задачи**

### **1.1 Дистанционное зондирование Земли**

Методы дистанционного зондирования или мониторинг с использованием электромагнитного излучения различного спектрального диапазона получают все большее применение, поскольку являются экономичными и точными способами исследования веществ и окружающего пространства, позволяющих получать информацию в режиме реального времени. Подобным образом ведутся исследования космических объектов, различных слоев атмосферы, экологической обстановки, как в промышленных центрах так и в целом на планете, проводится лабораторный анализ веществ и поиск полезных ископаемых.

Существующие методы позволяют осуществлять мониторинг из космоса устройствами, базирующимися на искусственных спутниках Земли [14], и станциями, находящимися в пределах земной атмосферы (станции мониторинга, аэросъемки [15-16]).

Результаты анализа предметной области позволили разделить методы дистанционного зондирования на два класса: пассивные и активные. Пассивное зондирование основывается на регистрации отраженного солнечного излучения, просуммированного с собственным излучением атмосферы, облаков и земного покрова [17] и ослабленного в атмосфере. В данном случае учитывают:

- 1) Прозрачность столба атмосферы между прибором и зондируемой поверхностью в рабочих участках спектра;
- 2) Излучение атмосферных источников и подстилающей поверхности, к которым относятся атмосфера, облака и земная поверхность;
- 3) Излучение космических источников: Солнца и Луны (если прибор находится на искусственном спутнике Земли).

При лидарном зондировании для определения степени прозрачности столба атмосферы в рабочих участках спектра, то есть наличия на трассе искомого газа, основным показателем являются спектр поглощения различных газов в заданном диапазоне длин волн, как правило от 100 м до 100 нм [18-19]. В таком случае величина отраженного сигнала принятого фотоприемником устройства, при пассивном зондировании, зависит от местоположения рабочего участка в солнечном спектре [16].

Активное дистанционное зондирование зачастую проводится в видимом диапазоне с помощью лидаров [4], или в радиодиапазоне [5].

При зондировании из космоса используется сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон волн – от миллиметров до нескольких сантиметров. В этом диапазоне атмосфера Земли обладает высокой прозрачностью, поэтому радиометры и радиолокаторы позволяют с высокой эффективностью осуществлять зондирование земных покровов, причем, независимо от наличия облаков. Электрические свойства различных природных образований в радиодиапазоне обычно характеризуются диэлектрической постоянной и их температурой, которая для большинства природных объектов составляет величину 2-5, а для воды при 20°C - около 80 [11]. Именно такой контраст позволяет эффективно применять микроволновое зондирование природных объектов, связанных с присутствием влаги: определять влажность почв, засоленность водоемов и почв, температуру поверхности, ледовую обстановку в районе северного морского пути Арктики [20]. Проникающая способность радиоволн позволяет получить особую информацию о земных покровах, которую не удастся извлечь из наблюдений в оптическом диапазоне. Так, в известной степени радиоволны позволяют "преодолеть" экранирующий эффект растительных покровов и получить информацию непосредственно о свойствах земных грунтов. Кроме того, с помощью радиоволн осуществляется глубинное зондирование грунта, снега, льда, что позволяет выносить более объективные суждения о физическом состоянии земных покровов [7-8].

При зондировании наземными приборами, стационарными или мобильными, решается ряд задач. Например, поиск утечек газа из подземных газопроводов, исследование атмосферы и грунтов, определение нормы концентрации определенных газов в атмосфере замкнутых сооружений (метро), определение наличия метана и/или углекислого газа в штреках, штольнях и забоях, поиск и локализация нефте-газоносных месторождений при геологоразведке, а также задачи экологического мониторинга углекислоты (определение нормы на выброс углекислого газа в атмосферу на выходе технологического процесса предприятий). Известны также решения задач зондирования в области растениеводства, например, наблюдение за нормированием углекислого газа в атмосфере парника для роста растений. В медицине для жизнеобеспечения человека применяют технологии прокачки анестезирующего вещества через углекислый газ в замкнутом цикле реанимации и т.п. [21].

## 1.2 Спектры излучения Солнца и Земли

При дистанционном зондировании Земли и земной атмосферы необходимо учитывать два мощных источника электромагнитного излучения: Солнце и Землю [22-23].

В некотором приближении излучение Солнца можно рассматривать как фотонный газ с температурой  $T_c = 5800$  К. Известно, что мощность излучения Солнца, приходящего на единичную перпендикулярную площадку описывается солнечной постоянной ( $I_c$ ), величина которой зависит от расстояния планеты до Солнца и для Земли определяется формулой:

$$I_c = (R_c / L_3 - c)^2 \sigma T_c^4, \quad (1.1)$$

где  $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>\*К<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана;

$R_c = 695\,990$  км – радиус Солнца;

$L_{z-c} = 1 \text{ а.е.} = 149\,600\,000$  – расстояние от центра Солнца до Земли.

Согласно измерениям со спутников, величина солнечной постоянной составляет  $I_c = 1370 \text{ Вт/м}^2$ . Соответственно, в среднем за сутки на единицу поверхности Земли падает из космического пространства  $(1/4) I_c = 343 \text{ Вт/м}^2$ . Из них 30% отражается обратно в космическое пространство за счет планетарного альбеда Земли ( $A = 0.3$ ). В результате, мощность солнечного излучения, входящего в атмосферу Земли и определяющая тепловой баланс планеты равна:

$$(1/4) I_c (1-A) = 240 \text{ Вт/м}^2. \quad (1.2)$$

Измерения показывают, что Земля в среднем поглощает  $240 \text{ Вт/м}^2$  солнечного излучения с температурой  $T_c = 5800 \text{ К}$  и излучает такую же интенсивность теплового излучения с эффективной температурой  $T_z = 255 \text{ К}$ , что является простым следствием выполнения радиационного (энергетического) баланса:

$$(1/4) I_c (1-A) = \sigma T_z^4. \quad (1.3)$$

Таким образом, зная температуру источников излучения и используя модель излучения абсолютно черного тела можно получить спектры излучения Солнца и Земли (рисунок 1.1).

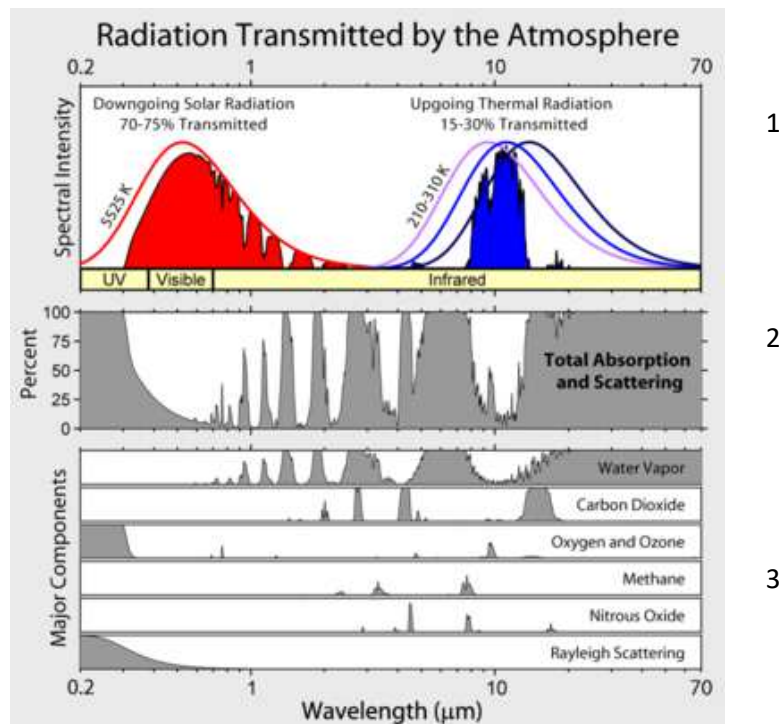


Рисунок 1.1 – Прозрачность атмосферы Земли в видимом и инфракрасном диапазонах (поглощение и рассеивание): 1. Интенсивность солнечной радиации (слева) и инфракрасного излучения поверхности Земли (справа) - даны спектральные интенсивности без учёта и с учётом поглощения. 2. Суммарное поглощение и рассеивание в атмосфере в зависимости от длины волны. 3. Спектры поглощения различных парниковых газов и рэлеевское рассеяние [4]

Спектры излучения этих двух мощных источников необходимо учитывать при анализе данных, полученных методами дистанционного зондирования. Для определения спектров излучения Солнца и Луны используется формула (1.4)

$$r_{v,T}^* = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{v^3}{e^{kT} - 1}, \quad (1.4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\nu$  – частота излучения;

$r_{\lambda, T}^*$  – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Однако, атмосферный состав Земли состоит из таких газов как: азот –  $N_2$  (около 78%), кислород –  $O_2$  (около 21%), аргон –  $Ar$  (около 1%), а также так называемые парниковые газы – это пары воды –  $H_2O$ , углекислый газ –  $CO_2$ , метан –  $CH_4$ , озон –  $O_3$ , окислы азота –  $N_xO_y$  и др. (менее 1%) (рисунок 1.2. и таблица 1.1). В атмосфере также присутствуют примеси аэрозоля, воды (облаков), частиц пыли, вулканической сажи и т.п. У каждого газа имеется свой собственный спектр поглощения, что не только искажает теоретическую зависимость (рисунок 1.1), но и усложняет анализ результатов, полученных спектральными приборами различного типа.

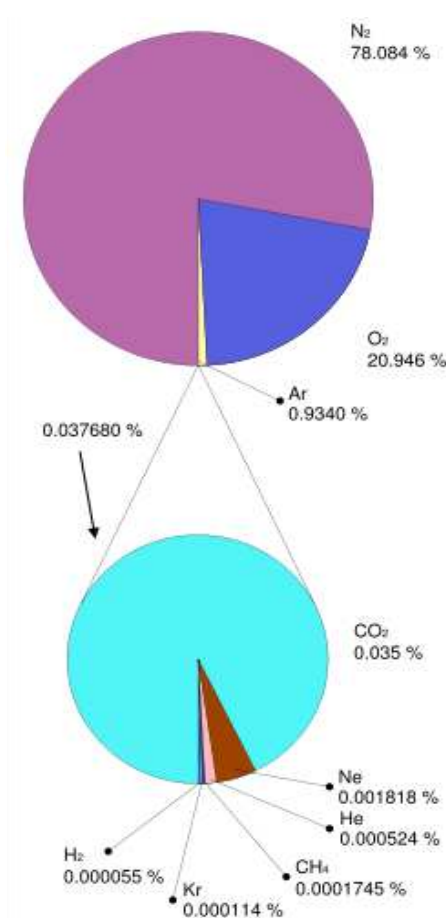


Рисунок 1.2 – Состав сухого воздуха



Таблица 1.1 – Состав сухого воздуха

Газ	Содержание по объёму, %	Содержание по массе, %
Азот	78,084	75,50
Кислород	20,946	23,10
Аргон	0,932	1,286
Вода	0,5-4	—
Углекислый газ	0,032	0,046
Неон	$1,818 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
Гелий	$4,6 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-5}$
Метан	$1,7 \times 10^{-4}$	—
Криптон	$1,14 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$
Водород	$5 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-5}$
Ксенон	$8,7 \times 10^{-6}$	—
Закись азота	$5 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-5}$

Таким образом, к спектральным приборам, применяемым для оптического зондирования, предъявляются высокие требования: разрешающая способность, чувствительность и т.д. Для приборов дистанционного зондирования активного типа имеются соответствующие требования к источникам излучения: узкий частотный диапазон, мощность излучения и др.

### 1.3 Базы данных атмосферного состава

Из пункта 1.2 следует, что необходимо учитывать радиационные и энергетические характеристики атомов и молекул при решении ряда задач в дистанционном зондировании. Кроме того, все эти характеристики достаточно важны при решении задач из других областей науки и техники.

Так, ведется создание соответствующих баз справочных данных, которые периодически обновляются для информационного обеспечения специалистов, инженеров и исследователей, работающих в области атомной и молекулярной физики, физики газовых разрядов, радиационной газовой динамики, квантовой электроники, астро- и геофизики, плазмо- и фотохимии, химической кинетики и термодинамики, квантовой химии и т.д.

На сегодняшний день существует большое число баз и банков данных как проблемно-ориентированных, так и широкопрофильных, которые в числе прочей информации содержат данные по радиационным и энергетическим параметрам природных составляющих, например базы данных GARNYOR, HITRAN, СПЕКТР, банк данных GEISA, система АТЛАС.

GARNYOR – постоянно пополняемая база данных, содержащая информацию об атомах, молекулах и газах [24]. В разделе "Свойства атомов и молекул" содержатся публикуемые результаты исследований уровней энергии, волновых функций, дипольных и мультипольных моментов, потенциальных кривых, вероятностей переходов, радиационных времен жизни и т.д. Для примера были взяты данные поглощения паров воды из базы данных GARNYR (рисунок 1.3).

HITRAN – периодически обновляемая база данных, содержащая параметры молекулярных спектральных линий, которые необходимы при расчетах возникновения и переноса излучения в атмосфере. Версия 2016 г. [25-26] включает данные для 37 молекул, главным образом двух- и трехатомных. Область спектра 0 - 17000 см<sup>-1</sup>. Собираемые параметры: волновые числа центров линий, интенсивности линий при T = 296 К, вероятности и квантовая идентификация переходов, энергии нижних уровней и т.д. Для примера были взяты данные поглощения паров воды из базы данных HITRAN2016 (рисунок 1.4).

Аналогичные данные содержатся в банке данных GEISA [27], системе АТЛАС [28]. HITRAN и GEISA хранят в себе результаты наиболее достоверных экспериментальных исследований, а АТЛАС включает в себя

данные квантово-химических расчетов. Большая часть информации, содержащейся в данных базах, имеет экспертную оценку надежности.

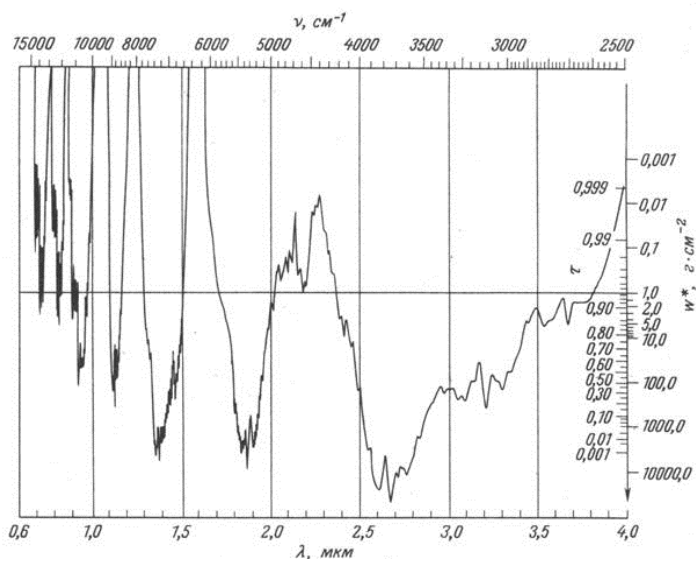


Рисунок 1.3 – Спектр поглощения паров воды из базы данных GARNYOR

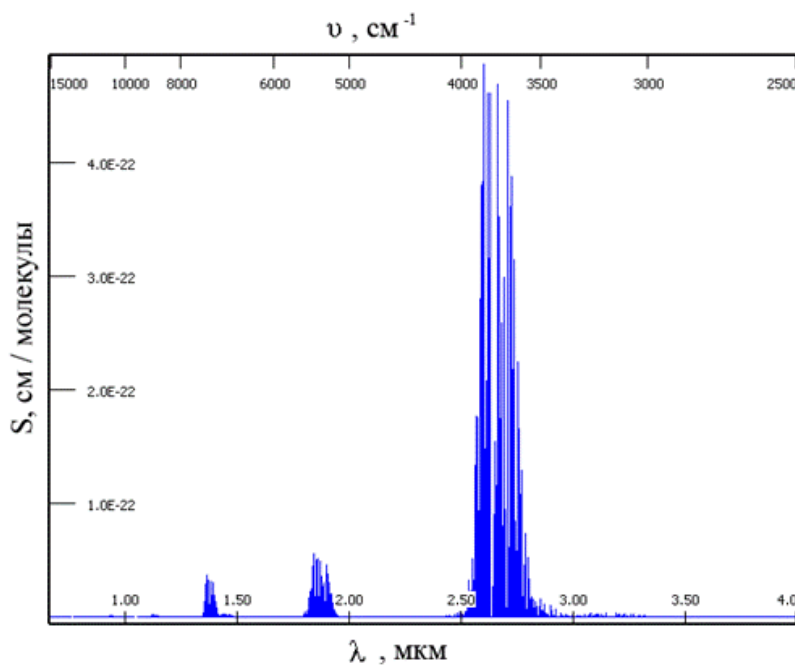


Рисунок 1.4 – Линии поглощения воды из базы данных HITRAN2016

## **1.4 Лидар. Существующие аналоги. Результаты патентного исследования**

В результате патентного исследования не было выявлено прямых аналогов разрабатываемым методам и системы обнаружения предельно низких концентраций метана (см. Приложение Е). Существующие аналоги способны измерять только высокие концентрации газов. Кроме того, большинство из них наземного базирования, что существенно усложняет разведку в труднодоступных территориях, например, в условиях Сибири и крайнего севера, и не могут функционировать автономно.

Анализ известных решений позволил выделить ряд приборов, вызывающих наибольший интерес, поскольку принцип их функционирования основан на совпадении частоты излучения He-Ne лазера, с колебательным переходом молекулы метана («Обзор-2», ЛГАУ-02, лидар дифференциального поглощения).

### **1.4.1 «Обзор-2»**

Габариты изделия 2700\*1000\*650. Вес изделия 200 кг. Мощность лазерного излучения по каналам:  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм – не менее 15 мВт,  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм – не менее 7 мВт. Энергопотребление по сети +27 В – не более 1 кВт. Время прогрева не более 30 мин.

В основу работы системы «Обзор-2» положен метод активного лазерного зондирования слоя атмосферы с регистрацией излучения, рассеянного отражающей поверхностью. Система регистрирует аномальное содержание метана в зондируемом слое атмосферы, когда интегральное его содержание на оптическом пути излучения превышает порог срабатывания, равный 0,1 атм.см. (при давлении 84 кПа). Резонансное поглощение, имеющее место, когда длина волны электромагнитного излучения совпадает с одной из спектральных линий молекул исследуемого вещества, считается

самым чувствительным из оптических методов обнаружения газов в атмосфере. В системе «Обзор-2» использовано известное совпадение длины волны генерации He-Ne лазера вблизи 3,39 мкм с линией поглощения метана. Важным достоинством выбранного метода является высокая избирательность обнаружения метана, так как в данной области практически отсутствует наложение спектров поглощения обычных атмосферных газов.

Для исключения дестабилизирующих факторов, в том числе ослабления лазерного излучения атмосферой, применен метод дифференциального поглощения.

Источниками излучения в передающем блоке являются два лазерных генератора «Миссия-1», настроенные на длины волн генерации  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм и  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм с выходными мощностями  $P_1 = 10$  мВт и  $P_2 = 5$  мВт соответственно. Выходное излучение генераторов поступает на два усилителя лазерного излучения «Миссия-1-1», при этом мощности излучения по двум длинам волн составляют  $P_1 = 20$  мВт и  $P_2 = 10$  мВт соответственно. Затем излучение поступает на формирующую оптическую систему передающего блока, формирующая оптическая система осуществляет модуляцию излучения таким образом, что на выходе образуется последовательность чередующихся квазипрямоугольных импульсов по двум длинам волн и отличающихся по амплитуде. Частота модуляции (переключения) составляет 3400 Гц.

Промодулированное излучение направляется оптической системой на отражающий объект. Часть отраженного излучения улавливается приемным объективом и фокусируется на фоторезистор. При этом на нем возникает переменный электрический сигнал, величина которого пропорциональна разности мощностей принятых импульсов излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Основные характеристики прохождения в атмосфере и отражение для излучения с близкими длинами волн одинаковы.

Поэтому при малом содержании метана на пути лазерных лучей сигнал с фотоприемника будет представлять собой последовательность

чередующихся импульсов разной амплитуды, аналогичную последовательности посылаемых импульсов. Излучение лазера с большей мощностью и длиной волны  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм ослабляется метаном на порядок сильнее и при значительной концентрации метана на фотоприемнике будет также последовательность чередующихся импульсов разной амплитуды, но находящаяся в противофазе к последовательности посылаемых импульсов. Момент изменения фазы принимаемого сигнала на  $180^\circ$  характеризует некоторое пороговое интегральное содержание метана. Регистрация сигнала в противофазе, относительно посылаемого, соответствует аномальному содержанию метана больше порогового в зондируемой зоне. Начальное усиление сигнала с фоторезистора производится в усилителе приемника и в блоке предварительного усилителя.

Дальнейшая обработка электрического сигнала осуществляется в блоке электроники, который необходим для последующего усиления сигнала и его фильтрации, детектирования и выдачи информации о наличии метана и о величине отраженного сигнала на пульт оператора.

Индикация о регистрации аномального содержания метана осуществляется в виде светового сигнала и звукового сигнала высокого тона. Индикация о недостаточной, оптимальной и избыточной величине отраженного сигнала при отсутствии метана осуществляется световыми сигналами. Индикация недостаточной величины отраженного сигнала дублируется звуковым сигналом среднего тона. Кроме того, на пульт оператора выводится звуковая (сигнал низкого тона) и световая информация о неисправности системы.

Для контроля работоспособности изделия в оба лазерных пучка вносятся кюветы с метаном, которые создают эквивалент эталонного слоя метана. При этом в наушниках должен звучать сигнал высокого тона, который свидетельствует в данном случае о нормальной работе изделия.

Настройка аппаратуры осуществляется поочередным внесением кювет в пучки лазерного излучения.

#### 1.4.2 Лазерный газоанализатор «ЛГАУ-02»

Данный прибор разработан И. А. Бубличенко и Б. Е. Мохноножкиным в Московском государственном инженерно-физическом институте (технический университет) [3-5].

Основные характеристики прибора: диапазон измерений 3-1000 ppm, относительная погрешность измерений в диапазоне 3-10 ppm – <20%, в диапазоне 10-1000 ppm - <10%, время установления показаний <2 с, габариты 600 × 240 × 135 мм, масса 13 кг.

В основу работы прибора положены прямой абсорбционный метод детектирования углеводородов, двухканальная оптическая схема с двухзеркальной многоходовой кюветой (м.х.к.), двухканальное синхронное детектирование и цифровая обработка сигнала. В м.х.к. измеряется ослабление излучения одной из наиболее сильных линий генерации He-Ne-лазера с длиной волны 3.3922 мкм ( $2947.9 \text{ см}^{-1}$ ), которая попадает в полосу поглощения углеводородов и практически совпадает с центральной частотой линии  $F_1$  перехода  $P(7)$  полосы  $V_3$  поглощения метана [4] (рисунок 1.5). Ширина спектра генерации лазера во много раз меньше отдельных линий поглощения газов, поэтому такое совпадение обеспечивает высокую чувствительность и селективность по отношению к основным составляющим атмосферы, включая углекислый газ и водяной пар. Чувствительность к другим углеводородным газам примерно одинакова [3-4].

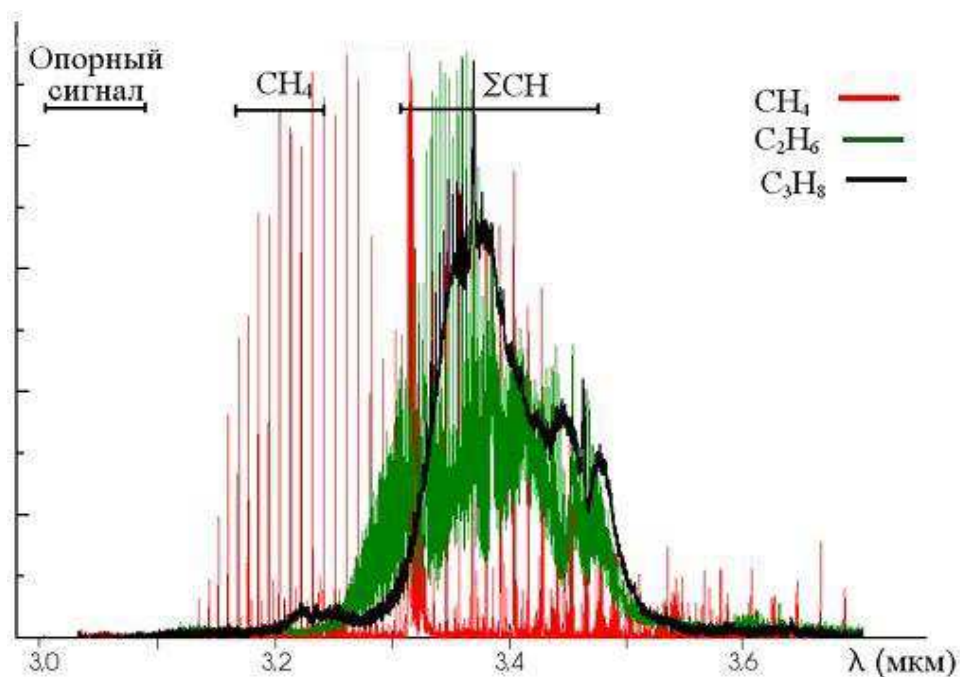


Рисунок 1.5 – Спектры определяемых газов и выбранные для измерения их концентраций спектральные интервалы [22]

Оптическая часть ЛГАУ (рисунок 1.6) идентична оптической части аналоговой версии прибора [22] и содержит источник излучения 1 – лазер, излучающий на длине волны 3.3922 мкм, три сферических зеркала 2, 5, 6, м.х.к. 3 и два фотоприемника 7, 8. Оптическая часть выполнена на жестком основании корпуса прибора из дюралюминиевого двутавра. Особое внимание уделено подавлению влияния интерференции в оптических элементах [4] и в м.х.к. [5]: прозрачные элементы выполнены клиновидными, а число ходов в м.х.к. ограничено.

Число прозрачных элементов сведено к минимуму, подвижные узлы отсутствуют. Зеркала и фотоприемники попарно объединены в моноблоки, жестко укрепленные на основании. Узлы крепления зеркал обеспечивают возможность регулировки их наклона.

Промодулированное излучение лазера (1) направляется зеркалом (2) в м.х.к. (3) сквозь входное окно (4). Вышедший из нее измерительный пучок направляется зеркалом (5) на измерительный фотоприемник (7). Опорный пучок направляется зеркалом (6) на опорный фотоприемник (8), минуя м.х.к.



(3). По обоим оптическим каналам на фотоприемниках формируются изображения одного и того же сечения исходного лазерного пучка с равными увеличениями. Измерительный фотоприемник оптически сопряжен с задней главной плоскостью м.х.к., а опорный – с плоскостью, удаленной от лазера как передняя главная плоскость м.х.к.

Лазер изготовлен на основе серийного лазера ЛГИ-201 с возбуждением поперечным высокочастотным полем (завод «Кентавр», Ровно, Украина). Штатные зеркала резонатора заменены сферическими с радиусом кривизны 2 м: «глухое» – на алюминиевое, а выходное – на однослойное германиевое с коэффициентом отражения  $\sim 0.8$ , что обеспечивает генерацию на длине волны 3.3922 мкм при гарантированном подавлении генерации на длине волны 1.15 мкм.

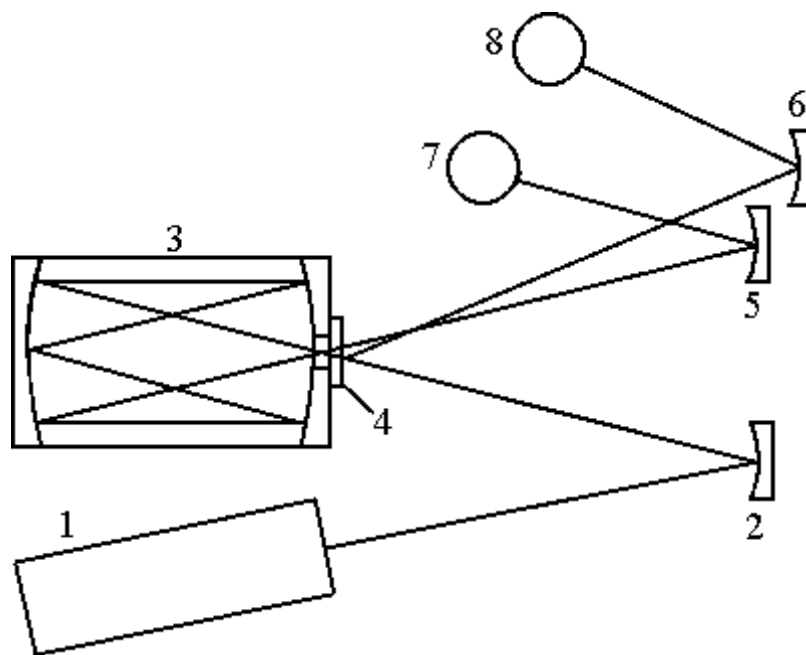


Рисунок 1.6 – Схема оптической части ЛГАУ.

1 – лазер; 2, 5, 6 – сферические зеркала; 3 – м.х.к.; 4 – входное окно; 7,8 – измерительный и опорный фотоприемники

Структурная схема электронной части ЛГАУ приведена на рисунке 1.7.

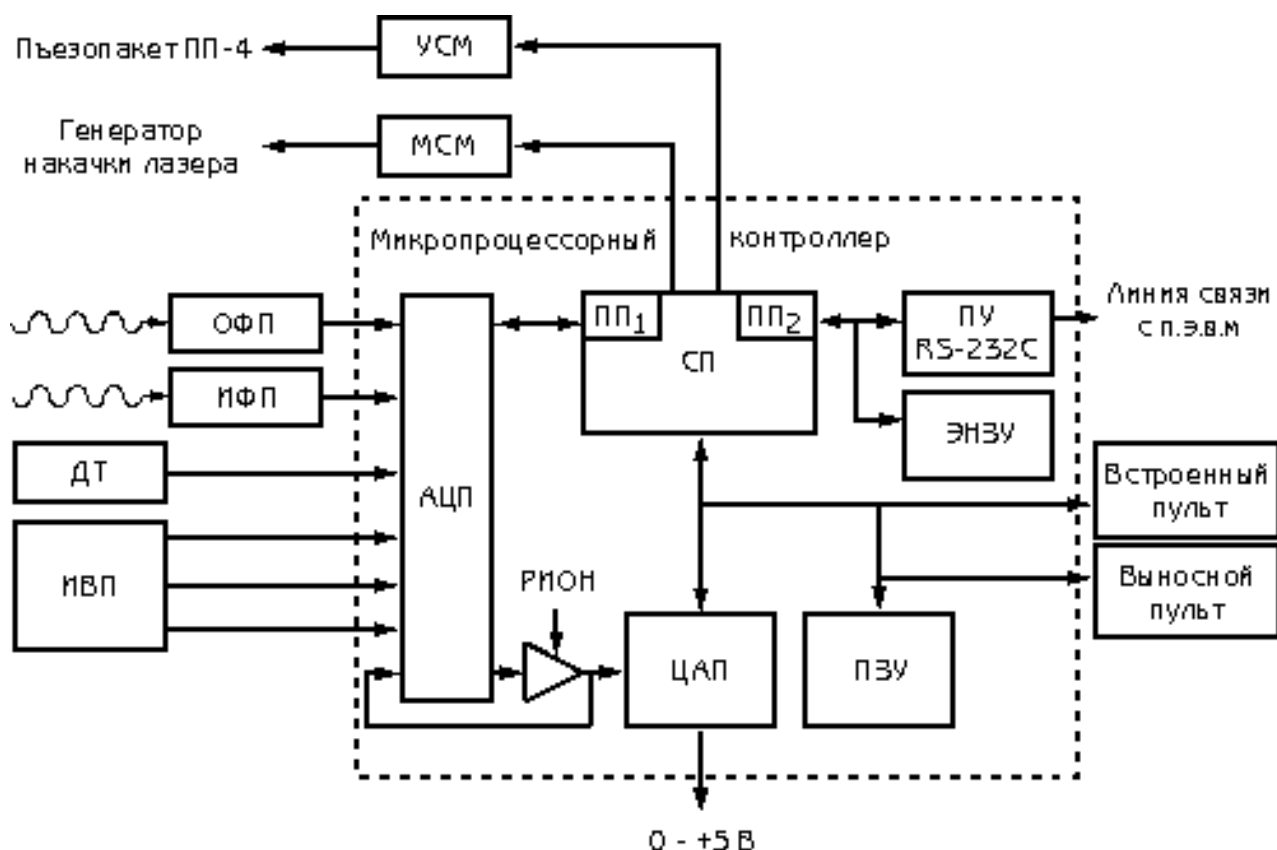


Рисунок 1.7 - Структурная схема электронной части ЛГАУ

Источники вторичного питания (ИВП) формируют необходимый набор напряжений для работы схемы. Модулятор-стабилизатор мощности лазера (МСМ) служит для получения модулированного излучения и, как и усилитель сигнала модуляции (УСМ), управляется контроллером.

Микропроцессорный контроллер содержит 16-разрядный сигнальный процессор ADSP-2101 (СП) фирмы Analog Devices с тактовой частотой 16 МГц, 8-канальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь AD7890 (АЦП), 12-разрядный цифроаналоговый преобразователь КР572ПА2 (ЦАП), энергонезависимую память 93С56 (ЭНЗУ), преобразователь уровней RS-232С типа AD202 (ПУ) и интерфейсную логику с встроенным и выносным пультами (на рисунке 1.7 не показана). При подаче напряжения питания или нажатии кнопки аппаратного сброса сигнальный процессор контроллера загружает программу из внешнего постоянного запоминающего устройства ПЗУ 27С128.

Сигнальный процесс имеет два независимых синхронных последовательных порта ПП<sub>1</sub> и ПП<sub>2</sub>, к одному из которых подключен АЦП, а к другому - ЭНЗУ и преобразователь уровней RS-232C. С помощью АЦП измеряются сигналы, поступающие с усилителей опорного и измерительного каналов фотоприемников (ОФП и ИФП) и датчика температуры (ДТ), а также контролируются напряжение регулируемого опорного источника ЦАП (РИОН) и напряжения питания, получаемые от ИВП. ЭНЗУ используется для хранения параметров фотометрической схемы, калибровочных данных, установок предупредительной и аварийной сигнализации. Преобразователь уровней RS-232C служит для связи с персональным компьютером для накопления и дальнейшей обработки полученных данных. Старт-стопный режим обмена эмулируется программным образом. С помощью ЦАП реализован стандартный аналоговый выход 0-5 В на внешний комплекс сбора данных. Концентрация определяется на основе закона Бугера-Бера из соотношения сигналов двух каналов детектирования, постоянная времени интегрирования – 0.5 с.

Управление газоанализатором осуществляется при помощи шести кнопок встроенного пульта на передней панели. Предусмотрено пять режимов работы: запуск; измерение, индикация и передача вычисленных значений текущей концентрации, температуры, напряжений питания, а также измеренных напряжений по всем входам АЦП; коррекция показаний; коррекция нуля сигналов; просмотр и коррекция параметров. Передача данных по последовательному каналу осуществляется по окончании цикла измерений. В пакет данных общим размером 210 байт входят 30 параметров и констант, скорость передачи 38400 бод, цикл передачи 0.5 с, длительность передачи ~0.1 с.

Опытные работы по поиску утечек газа проводились совместно с городскими газовыми службами Рязани и Санкт-Петербурга. Прибор размещался в автофургоне «УАЗ-452» и питался от аккумулятора 24 В. В Санкт-Петербурге ЛГАУ использовался в автолаборатории «Искатель»

одновременно со штатным серийным газоанализатором с общей системой пробоотбора. Испытания прошли успешно.

### **1.4.3 Вертолетный лазерный газоанализатор ТЛГ-01В**

Состав оборудования:

- a) Лазерный излучатель;
- b) Приемо-передающий оптический тракт;
- c) Система управления комплексом;
- d) Сканирующее устройство;
- e) Телевизионный прицел;
- f) GPS-приемник;
- g) Система сбора и отображения информации.

Технические характеристики ТЛГ-01В (вертолетный вариант):

- a) Длина трассы зондирования 60...150 м;
- b) Минимально измеряемые концентрации некоторых газов:
  - 1) метан, пропан, бутан (без сканирования) 3 ppm;
  - 2) метан, пропан, бутан (в режиме сканирования) 4 ppm;
- c) Диапазон перестройки длины волны излучения 2,7...3,5 мкм;
- d) Оперативная перестройка длины волны излучения для выбора регистрируемого газа;
- e) Точность определения места утечки: при вертолетном базировании  $\pm 10$  м;
- f) Оперативная оценка расхода газа из утечки с точностью 20%;
- g) Минимальные обнаруживаемые утечки метана (в зависимости от условий) 5...7 м<sup>3</sup>/час;
- h) Полоса обзора в режиме сканирования (вертолетное базирование) 40 м.

Особенности лазерного газоанализатора ТЛГ-01В:

а) В качестве лазерного излучателя используется параметрический генератор света (ПГС), обеспечивающий в импульсе пиковую мощность более 100кВт, что, в свою очередь, позволяет обеспечить наибольшую чувствительность по сравнению с газовыми и полупроводниковыми лазерными излучателями;

б) Рабочий спектральный диапазон ПГС позволяет контролировать более 20 классов газообразных примесей в атмосфере, в том числе: метан, этан, пропан, бутан, меркаптан, пары воды, метанола, этанола, аммиака;

в) Лазерный газоанализатор является измерительным прибором, определяющим среднюю по трассе зондирования концентрацию газовой примеси в атмосфере;

г) Лазерный газоанализатор позволяет оценить расход газа в обнаруживаемых утечках на газопроводах и конденсатопроводах;

д) Наличие пространственного сканирования зондирующего излучения позволяет исключить влияние направления ветра на обнаружительную способность газоанализатора при техническом контроле трубопроводов;

е) Общая стоимость проводимых с помощью ТЛГ-01В обследований, по совокупности оказываемых услуг, значительно меньше, по сравнению с аналогичными обследованиями.

### **1.4.3 Лидар дифференциального поглощения**

Работа лидара основана на методе дифференциального поглощения (рисунок 1.8) :

- а) Длина трассы зондирования 100-1000 м;
- б) Максимальная ширина трассы зондирования 30 м;
- в) Минимально измеряемая концентрация газа 50 ppm;
- г) Лазер использует средневолновый ИК диапазон.



Рисунок 1.8 – Система авиационного зондирования лидара

Система может регистрировать большое количество различных газов, но не может делать это одновременно. Для этого необходима перестройка лазера (мощность, длина волны и т.д.) под конкретный газ. Измерения можно проводить в любое время суток, благодаря использованию ИК лазера, что позволяет точно определять и локализовать области выбросов газа. Система способна регистрировать до 3000 точек в секунду (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Точки замера концентрации по трассе зондирования



Пример использования лидара представлен на рисунках 1.10 и 1.11. При съемке замеряются и выводятся на экран концентрации выбросов метана.

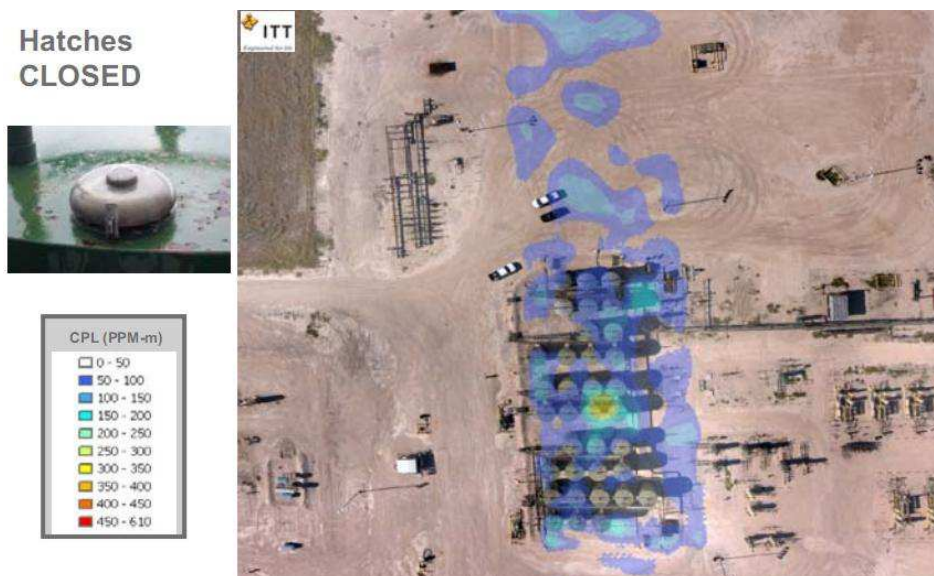


Рисунок 1.10 – Пример замера концентрации метана при закрытом люке

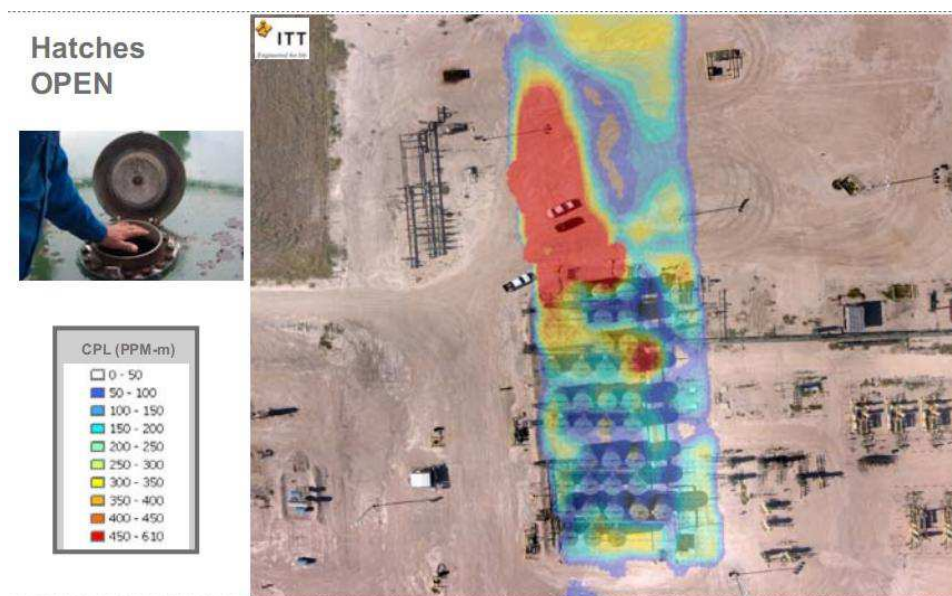


Рисунок 1.11 – Пример замера концентрации метана при открытом люке

## 1.5 Выводы по главе

Анализ предметной области и результаты патентного исследования показали:

1. Для повышения точности и оперативности обнаружения метаносодержащих веществ в атмосфере и приземном слое наиболее эффективным следует считать способ активного лидарного зондирования, позволяющего с высокой селективностью определять искомый газ.

2. С учетом известных научных и технических достижений в области анализа метаносодержащих веществ в основу разрабатываемого метода следует заложить принцип селективного, резонансного поглощения метаном лазерного излучения с длиной волны  $\lambda_1=3.3922$  мкм.

3. Анализ атмосферного состава земли, спектров поглощения и принципов комбинационного рассеивания лазерного излучения на молекулах газов показал высокую степень вносимых дестабилизирующих факторов в процесс лидарного зондирования, что обуславливает отсутствие на рынке систем позволяющих определять метан с точностью до единиц приведенного слоя.

4. По результатам патентных исследований прямых аналогов разрабатываемого комплекса не выявлено (Приложение Е). Известные аналоги имеют низкую степень чувствительности и предназначены для измерения высоких концентраций метана (более 10 ppm).

5. Для создания системы дистанционного зондирования атмосферы позволяющей определять метан с высокой избирательной способностью и точностью следует учитывать влияние внешних факторов в первую очередь паразитной солнечной засветки, рассеивания излучения на парах воды и отражения от поверхности лесного покрова.

6. Для оперативного получения информации и высокого охвата исследуемых территорий следует предусмотреть базирование лидара на летательном аппарате. При этом, с учетом последних достижений электроники и микропроцессорной техники, а так же учитывая



экономическую целесообразность поисковых мероприятий в качестве летательного аппарата, в первую очередь, следует рассматривать БПЛА. Это предполагает высоты лета в пределах 50-200 м.

Полученные результаты обуславливают необходимость разработки модели трассы лазерного пучка позволяющей учитывать влияние основных дестабилизирующих факторов при условии авиационного базирования установки.

Основываясь на вышеизложенном был определен следующий перечень основных технических характеристик и условий эксплуатации лидара для разработки модели трассы:

- а) Расстояние до отражающей поверхности от 50 до 200 м;
- б) Атмосферное давление в диапазоне от 84 до 106.7 кПа;
- с) Температура окружающей среды от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ ;
- д) Относительная влажность до 95% при  $T = 35^{\circ}\text{C}$ ;
- е) Мощность лазерного излучения по каналам: для  $\lambda_1=3.3922$  мкм не менее 12 мВт; для  $\lambda_2=3.3912$  мкм не менее 6 мВт.

Полученные результаты позволяют перейти к разработке математической модели трассы лидара, а также программной модели лидарной установки и отработки основных алгоритмов дистанционного зондирования, позволяющих выявлять предельно низкие концентрации метана.

## 2 Разработка математической модели трассы

### 2.1 Лидарное уравнение

Известны лидарные уравнения [6-7, 28-30]. В общем случае трассу прохождения светового пучка представляют в виде [29]:

$$W_p = W_0 * \frac{p}{\pi} * L(h_b) \quad (2.1)$$

где  $W_0$  – мощность отражаемого излучаемого сигнала;

$W_p$  – мощность отраженного сигнала;

$p$  – коэффициент отражения дна;

$L(h_b)$  – функция, учитывающая ослабление лазерного пучка при распространении ко дну и обратно.

Формула привлекает своей простотой и понятностью, но (2.1) возможно использовать только в конкретном случае зондирования для однородной среды, например, для исследования толщи воды или дна водоёмов. Использовать эту формулу для зондирования воздушного пространства в сочетании с приземным слоем атмосферы нельзя.

Предложенное в [12, 28] решение лидарного уравнения позволяет осуществить зондирование атмосферы:

$$S(z) = C * b(z) * \alpha(z) * e^{-2*\alpha(z)*z} * \left( \Gamma - \frac{d^2*\Gamma^3}{3} + \frac{d^4*\Gamma^5}{5*2!} - \frac{d^6*\Gamma^7}{7*3!} \right) \quad (2.2)$$

где  $S(v, z)$  – функция вида, представляющая сигнал, скорректированный на квадрат расстояния и геометрический фактор лидара:

$$S(v, z) = z^2 P(z) / G(z); \quad (2.3)$$

где  $P(z)$  – мощность отраженного сигнала;

$G(z)$  – геометрический фактор лидара;

$Z$  – расстояние зондирования;  
 $C$  – калибровочная константа лидара;  
 $\alpha(z)$  – коэффициент ослабления;  
 $b(z)$  – лидарное отношение, являющееся функцией частоты лазерного излучения и расстояния зондирования [28];  
 $\Gamma$  – полуширина линии генерации лазера.

Однако следует учесть, что данное решение было получено при ряде упрощений, которые не позволяют использовать данную формулу для разрабатываемой модели. Например, авторами было предложено не учитывать коэффициент рассеяния [28]. Для достижения поставленной цели проекта, а именно получения высокой чувствительности лидара, необходимо учитывать максимально возможное количество коэффициентов, влияющих на точность измерений, в том числе на мощность рассеянного сигнала. Известно решение, предложенное в [6-7].

$$P(\vartheta, z) = C * \frac{G(z)}{z^2} * \left[ \int_{\vartheta_0+\Gamma}^{\vartheta_0+\Gamma} e^{-2 * \int_0^z \alpha(v, z') dz'} \right] * v(\pi, z) * e^{-q^2 * (\vartheta - \vartheta_0)} d\vartheta \quad (2.4)$$

где  $z$  – расстояние зондирования;  
 $P(\vartheta, z)$  – мощность отраженного приземным слоем сигнала;  
 $C$  – калибровочная константа;  
 $G(z)$  – геометрический фактор лидара;  
 $\vartheta_0$  – частота максимума на линии генерации лазера;  
 $\Gamma$  – полуширина линии генерации лазера;  
 $\alpha(v, z')$  – коэффициент ослабления;  
 $v(\pi, z)$  – коэффициент рассеяния;  
 $q$  – коэффициент преобразования.

Однако данное решение предназначено для расчетов трассы при условии использования моностатического аэрозольного лидара.

Одно из наиболее адекватных решений лидарного уравнения предложено в [4, 31].

$$P_{\lambda}(R) = C * \frac{\beta_{\lambda}(R)}{R^2} * e^{-2 \int_0^R \alpha_{\lambda}(x) dx} \quad (2.5)$$

где  $R$  – расстояние до рассеивающего объема;

$C$  – калибровочная константа;

$P_{\lambda}(R)$  – мощность рассеянного излучения;

$\beta_{\lambda}(R)$  – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы;

$\alpha_{\lambda}(x)$  – объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы.

Учитывая вышеизложенное полученное решение было дополнено рядом коэффициентов, входящих в калибровочную константу, в том числе:

а) эффективность приемника;

б) эффективная площадь приемника.

Таким образом, полученная калибровочная константа приняла вид:

$$C = P_0 * \eta * c * \tau * A(R) \quad (2.6)$$

где  $C$  – значение калибровочной константы,

$c$  – скорость света;

$\tau$  – длительность лазерного импульса;

$P_0$  – мощность лазера;

$\eta$  – эффективность приемника (калибровочная константа);

$A(R)$  – эффективная площадь приемника;

Кроме того для исследуемого газа был введен коэффициент молекулярного ослабления.

На основании введенных дополнений получено следующее решение:

$$P_{\theta}(R) = P_0 * \eta * c * \tau * A(R) * \frac{\beta(R)}{R^2} * e^{-2 \int_0^R \alpha(x) dx} \quad (2.7)$$

Полученное уравнение было представлено на языке M-Matlab (текст программы приведен в приложении А).

## 2.2 Разработка модели и обработка трассы в программном обеспечении Matlab

В соответствии с предложенной математической моделью, (см. Раздел 2.1), в среде графического программирования Simulink из состава программного обеспечения Matlab была разработана модель лидача (рисунок 2.1).

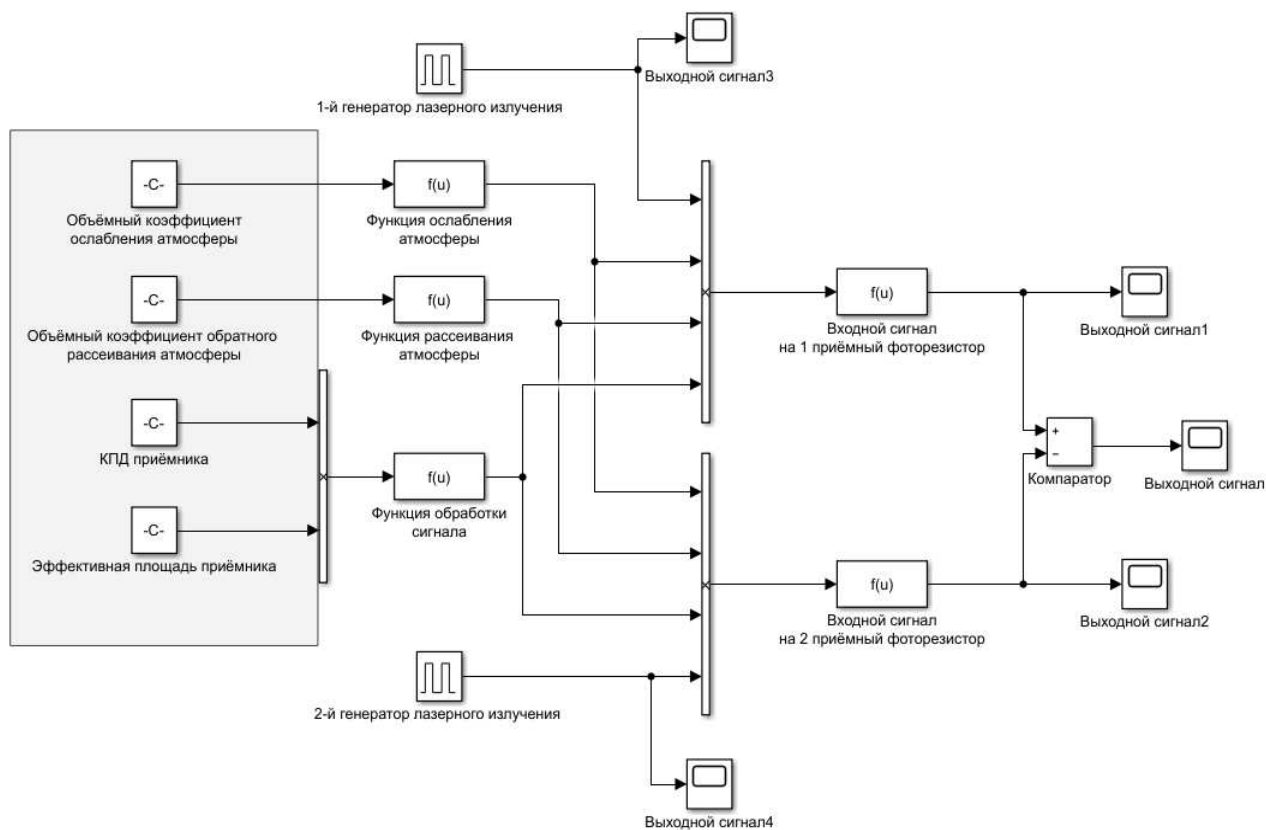


Рисунок 2.1 – Модель лидача в среде Matlab Simulink

В состав данной модели входит:

- 1-й и 2-й генераторы лазерного излучения. Имитируют излучения с лазеров с разными длинами волн  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм и  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм соответственно;

- Константное значение объемного коэффициента ослабления атмосферы (равное 0,0024);
- Константное значение объемного коэффициента обратного рассеивания атмосферы (равное 0,0005);
- Константное значение КПД приемника (равное 0,8);
- Константное значение эффективной площади приемника (равное 0,0181);
- Функция ослабления атмосферы. В данном модуле рассчитывается погрешность изменения излучения при ослаблении сигнала, проходящего через атмосферу;
- Функция рассеивания атмосферы. Предназначена для расчета погрешности изменения излучения при рассеивании сигнала, проходящего через атмосферу;
- Функция обработки сигнала. Рассчитывает параметры фоторезистора, учитывая его КПД и эффективную площадь работы;
- Входные сигналы на 1 и 2 фоторезистор. Имитируют результат полученный на фоторезисторы через пройденную среду атмосферы ;
- Компаратор, принимающий на свои входы два аналоговых сигнала с фоторезисторов и выдающая сигнал высокого уровня, если сигнал на неинвертирующем входе («+») больше, чем на инвертирующем (инверсном) входе («-»), и сигнал низкого уровня, если сигнал на неинвертирующем входе меньше, чем на инверсном входе. Выход компаратора показывает определенное соотношение метана.

При моделировании учитывалась высота и скорость полета. Согласно предварительным исследованиям в распоряжении потенциальных заказчиков имеется парк летательных аппаратов с крейсерской скоростью 450 км/ч и допустимыми высотами лета для зондирования от 30 до 100 м. При моделировании высота лета (длина трассы – R) было взято равным 50 м.

Для гелий-неонового лазера с заданными длинами волн 3,3922 мкм и 3,3912 мкм известны параметры пятен засветки на отражающей поверхности.

Оба пятна имеют диаметры 30 см на удалении 50 м. Соответственно расстояние между центрами пятна составит 7,5 сантиметров. Следовательно, расстояние, которое самолет пролетит над пятнами засветки, будет равно 0,375 метра. Крейсерская скорость самолёта равна 450 км/ч, или 125 м/с. Таким образом, самолет преодолеет расстояние смещения над пятнами засветки за 3 мс. Для исключения рассогласования приемник лидара должен принять не менее 10 импульсов, следовательно, период модуляции лазерного импульса должен быть не менее 300 мкс, что соответствует частоте модуляции 3400 Гц.

На основании частоты модуляции импульсов 3400 Гц, получен период лазерного импульса  $T = 300$  мкс, с помощью которого находится длительность лазерного импульса.

$$\tau = T/2 \quad (2.8)$$

В результате длительность лазерного импульса  $\tau$  равна 150 мкс. Мощности лазеров  $P_0$  известны: для первого лазера  $P_0 = 20$  мВт, для второго  $P_0 = 10$  мВт.

При коэффициенте эффективности приемника  $\eta = 0.8$ , объёмный коэффициент обратного рассеяния атмосферы, согласно табличным данным [32], равен  $\beta(R) = 6.83 * 10^{-6}$  для длин волн лазеров, используемых в модели данного проекта.

Рассчитаем эффективную площадь приемника  $A(R)$  согласно [22]:

$$A(R) = A_0 * \xi(R) \quad (2.9)$$

где  $A_0$  – площадь входной апертуры телескопа;

$\xi(R)$  – функция геометрического фактора (ФГФ) лидара, которая учитывает степень перехвата отраженного от мишени лазерного пучка.

Функция геометрического фактора, согласно [30], была взята равной единице, площадь входной апертуры телескопа, согласно [29] определена как:

$$A_0 = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (2.10)$$

где  $D$  – диаметр телескопа, для монтажа на фюзеляже летательного аппарата был взят равным 150 мм согласно требованиям летных испытаний.

Объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы  $\alpha$  для случая со вторым лазером берется равным 0, так как сигнал второго лазера не поглощается метаном. Полученный, в результате моделирования в пакете прикладных программ MatLab, график формы данного сигнала представлен на рисунке 2.2.

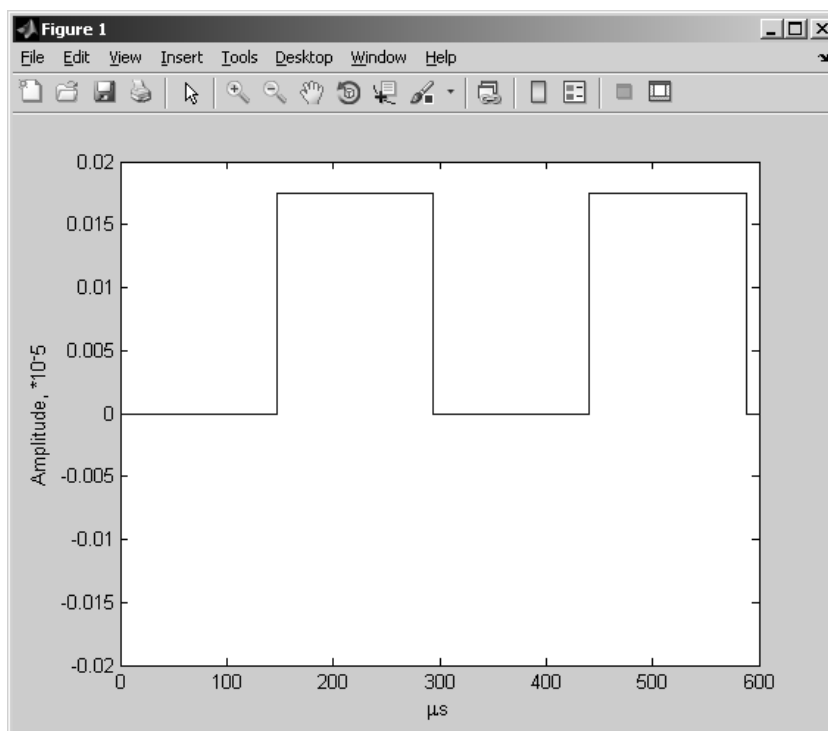


Рисунок 2.2 – Форма сигнала второго (опорного) лазера с уменьшенной мощностью после прохождения трассы

При моделировании трассы первого (измеряющего) лазера, варьируя значениями коэффициентов ослабления, имитировали количество метана



(коэффициент рассеивания) на трассе для разработанной модели. Графики для различных коэффициентов поглощения приведены на рисунках 2.5-2.9.

Например, если коэффициент рассеивания равен  $0.01 \text{ м}^{-1}$ , что соответствует содержанию метана порядка  $10^{-1} \text{ г/м}^3$ , то для «идеальной» модели значения амплитуды сигнала и график будут выглядеть следующим образом:

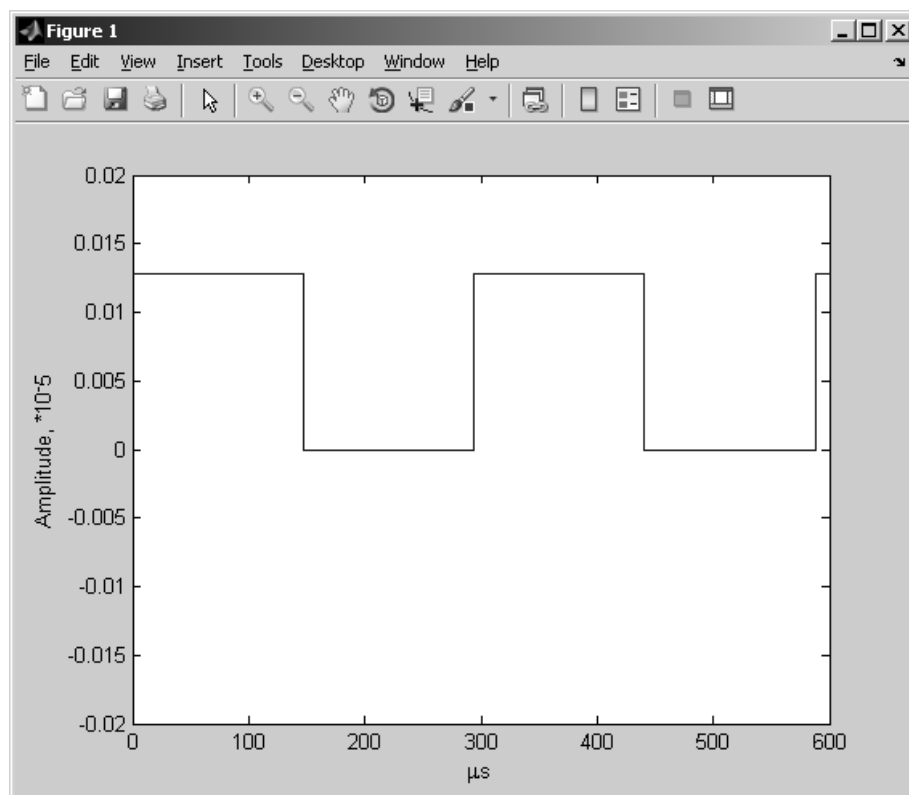


Рисунок 2.3 – Форма принятого сигнала задающего лазера с потерей мощности за счет рассеивания на молекулах метана (коэффициент ослабления  $0.01 \text{ м}^{-1}$  – содержание  $10^{-1} \text{ мм/м}^3$ )

На приемник будет поступать сигнал следующей формы:

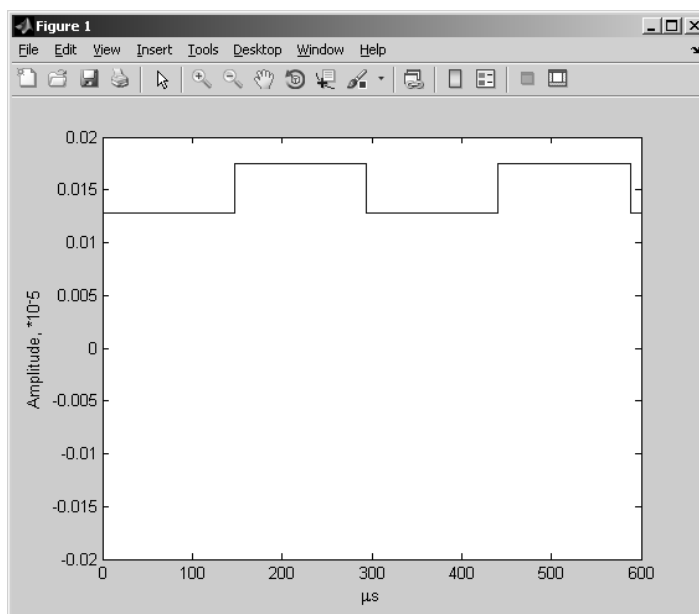


Рисунок 2.4 – Форма сигнала, на приемном датчике. Результат сложения сигналов, отображенных на рисунках 2.2 и 2.3

На рисунках 2.5 – 2.9 представлены результаты моделирования суммарной трассы распространения лазерного пучка, основного и синхронизирующего лазеров:

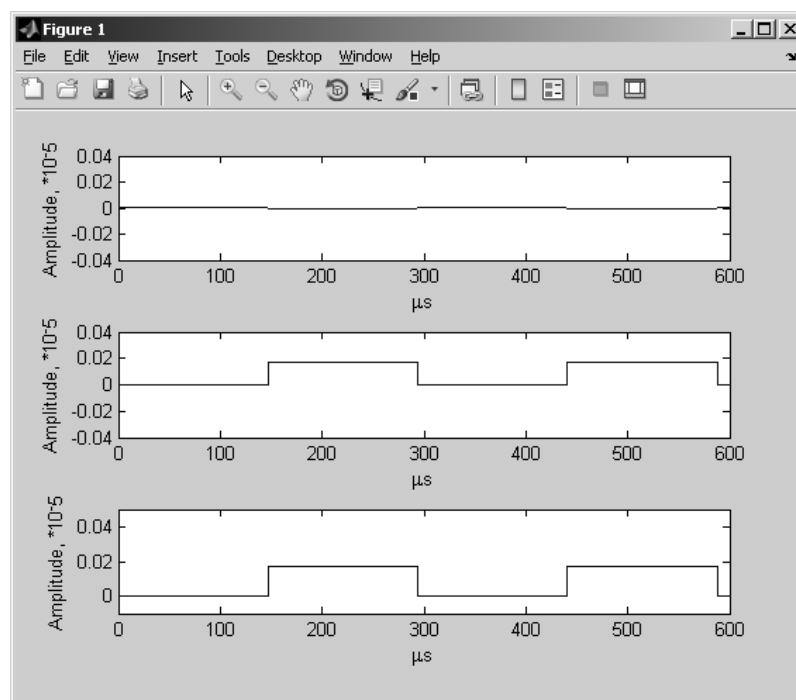


Рисунок 2.5 – Сигналы при коэффициенте ослабления атмосферы со значением 0.05.

Верхний и нижний графики отражают сигналы лазеров, третий – сумму сигналов

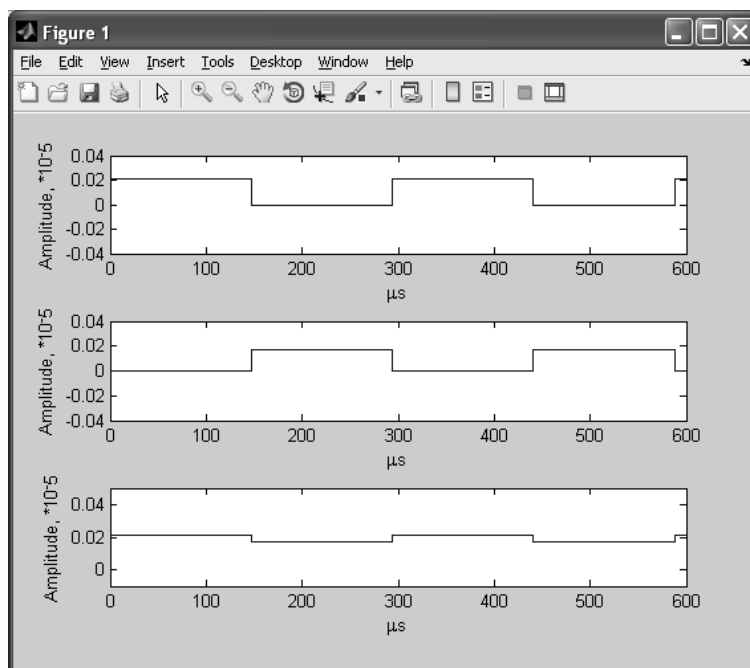


Рисунок 2.6 – Сигналы при коэффициенте ослабления атмосферы со значением 0.005. Верхний и нижний графики отражают сигналы лазеров, третий – сумму сигналов

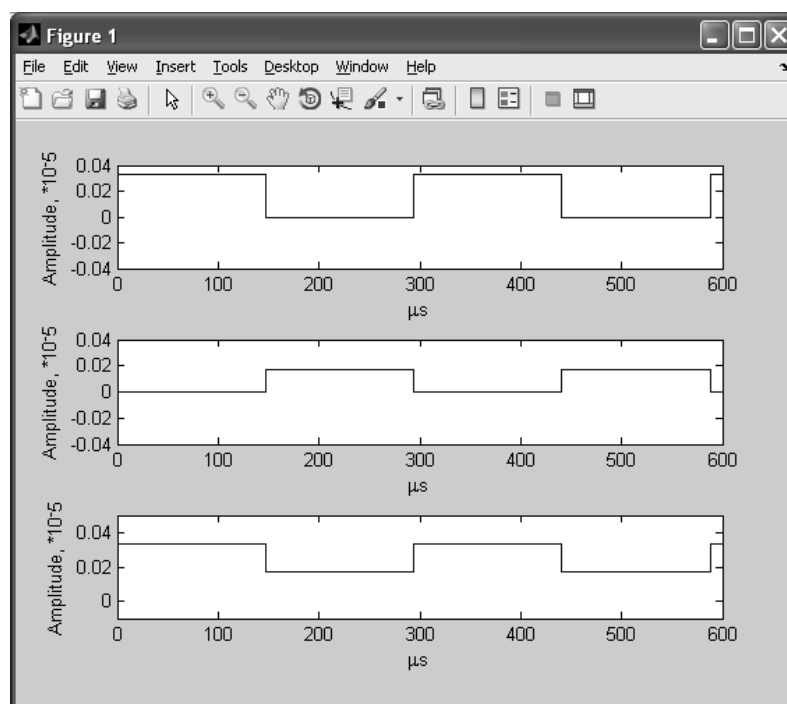


Рисунок 2.7 – Сигналы при коэффициенте ослабления атмосферы со значением 0.0005. Верхний и нижний графики отражают сигналы лазеров, третий – сумму сигналов

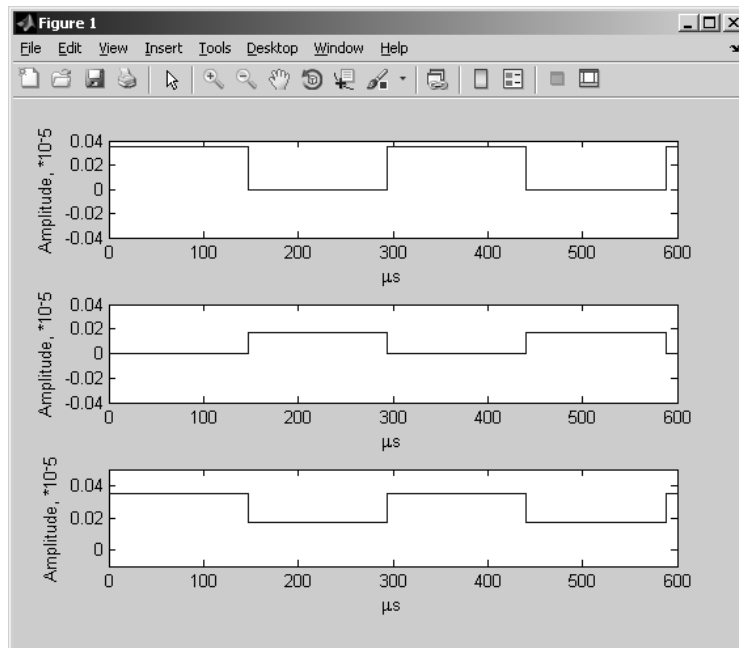


Рисунок 2.8 – Сигналы при коэффициенте ослабления атмосферы со значением 0.00005.  
Верхний и нижний графики отражают сигналы лазеров, третий – сумму сигналов

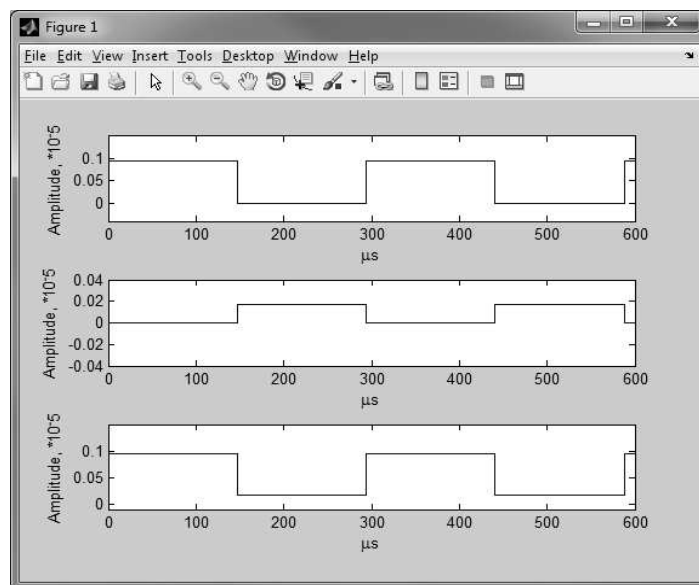


Рисунок 2.9 – Сигналы при коэффициенте ослабления атмосферы со значением -0.01.  
Верхний и нижний графики отражают сигналы лазеров, третий – сумму сигналов

Рисунки 2.5 и 2.9 демонстрируют два наиболее наглядных случая:

В первом случае содержание метана максимально, при этом амплитуда выходного сигнала минимальна – верхний график (рисунок 2.5), во втором

амплитуда сигнала максимальна (рисунок 2.9) – наличие метана минимально. При исследовании формы сигналов, поступающих на фоторезистор (суммы сигналов – третий график каждого из рисунков), можно заметить, что сигналы отличаются по фазе. При формировании выходного сигнала с датчика формируется электрический сигнал, затем он усиливается и осуществляется сравнение фаз с помощью компаратора, при смене фаз модель формирует сигнал о достижении заданной концентрации метана.

Коэффициенты, используемые на рисунках 2.5, 2.6, 2.67, 2.8, 2.9 наглядно демонстрируют изменение сигнала, первого лазера и суммированного сигнала, попадающего на фоторезистор при коэффициентах 0.05, 0.005, 0.0005, 0.00005, -0.01.

При построении модели приёмной аппаратуры, следует оперировать не мощностью сигнала, а силой тока, что будет являться интенсивностью поступающего излучения на фотоприемный элемент, следовательно, от мощности излучения необходимо перейти к интенсивности (току):

$$P_{out} = U * I_{out} \quad (2.11)$$

где  $P_{out}$  – выходная электрическая мощность;

$U$  – напряжение;

$I_{out}$  – интенсивность выходного излучения (сила тока).

Зная КПД фоторезистора (~15%), возможно посчитать интенсивность поступающего на вход фоторезистора излучения:

$$\eta_P = \frac{P_{out}}{P_\lambda} = \frac{U * I}{P_\lambda} * 100\% \sim I = \frac{\eta_P * P_\lambda}{U} * 100\% \quad (2.12)$$

где  $\eta_P$  – КПД фоторезистора;

$P_\lambda$  – потребляемая мощность излучения.

## 2.3 Выводы по главе

Результаты анализа известных лидарных уравнений позволили остановить выбор на модели наиболее соответствующей исследованиям, проводимым в рамках ВКР.

Модель расширена. В известное лидарное уравнение введен коэффициент молекулярного ослабления, так же введены поправки в калибровочную константу: эффективность приемника и эффективная площадь приемника, позволяющие учитывать особенности приемного тракта.

Таким образом, получена расширенная модель трассы лазерного пучка, на основании которой в среде Matlab Simulink разработана программная модель лидара.

Выполнена отработка полученных моделей, которая показала, что при моделировании тракта лазерного излучения были учтены основные дестабилизирующие факторы, вносящие помехи в исследуемый сигнал [33]. При этом прочие, такие как боковая засветка или отражение, не вносят значительных искажений и могут не приниматься во внимание.

По результатам моделирования определено, что ослабление атмосферой лазерного излучения сведено к минимуму, так как применяется метод резонансного поглощения на селективных длинах волн. При этом расчет введенных в лидарное уравнение коэффициентов способствует определению предельных концентраций в единицы ppm, но требует разработки специализированного программного и аппаратного обеспечения для автоматической, динамической калибровки лидара в процессе выполнения замеров, а так же фильтрации полезного сигнала в режиме реального времени [34].

При моделировании было определено, что использование введенных коэффициентов в 10 раз превышающих крайние значения нецелесообразно, так как формы выходных сигналов (амплитуды) не будут значительно

отличаться от предельных значений. Это обусловлено тем, что данный коэффициент используется в экспоненте лидарного уравнения.

Учитывая тот факт, что расчеты велись для летной высоты БПЛА в 50 м. отмечено, что степень экспоненты будет равна -5 при коэффициенте 0.05 в данном, конкретном случае.

При значениях, превышающих данное значение коэффициента, экспонента практически не отличается, поэтому для моделирования результаты этих расчетов и графиков не будут иметь значения. Случаи, когда коэффициент меньше -0.01, так же не имеют значительных отклонений, так как результаты расчетов будут противоречить логике, ведь мощность сигнала, выходящего из усилителя лазера, не может быть меньше мощности рассеянного сигнала, принимаемого датчиком.

Проведенный анализ результатов, полученных при моделировании трассы, позволяет перейти к разработке аппаратной части лабораторного демонстратора для отработки основных электронных компонент устройства управления лазерной установкой.

### **3 Проектирование аппаратной части лидара**

При реализации системы используется метод активного лазерного зондирования приземного слоя атмосферы с регистрацией излучения, рассеянного на молекулах метана. Интегральное содержание метана на оптическом пути излучения повышает порог срабатывания системы, благодаря этому разрабатываемая система регистрирует аномальное содержание метана в зондируемом слое атмосферы. Эффект резонансного поглощения имеет место, когда длина волны электромагнитного излучения совпадает с одной из спектральных линий молекул исследуемого вещества, этот феномен является основой метода, который, в свою очередь, считается самым чувствительным из оптических методов обнаружения газов в атмосфере. В реализуемой системе использовано известное совпадение длины волны генерации He-Ne (гелий-неонового) лазера вблизи 3.39 мкм с линией поглощения метана. Основным достоинством выбранного метода при этом является высокая избирательность обнаружения метана, так как в данной области спектра практически отсутствует наложение других обычных атмосферных газов.

Разработана функциональная схема установки лидарного зондирования (рисунок 3.1).



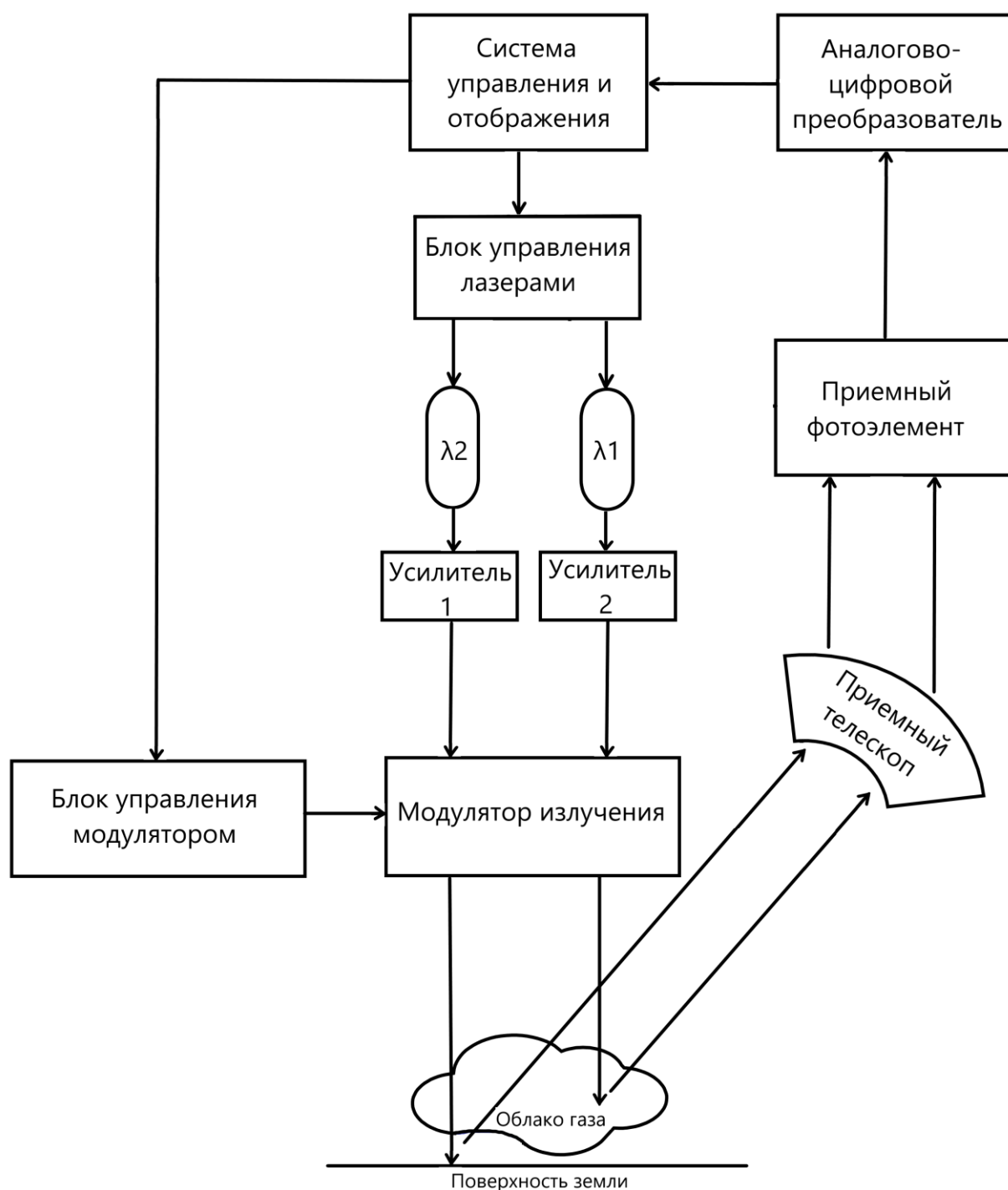


Рисунок 3.1 – Функциональная схема разрабатываемой системы

### 3.1 Устройство и принципы функционирования системы

Система посылает параллельно чередующиеся импульсы лазерного излучения с близким значением длин волн  $\lambda_1=3.3922$  мкм и  $\lambda_2=3.3912$  мкм,

причем  $\lambda_1$  на порядок сильнее, нежели  $\lambda_2$  поглощается метаном. Коэффициенты рассеивания и поглощения у обоих излучений одинаковы, за счет близких длин волн, что позволяет сравнить два сигнала после регистрации собранного приемным объективом излучения и выдает меру интегрального содержания метана вдоль оптического пути. В качестве источника излучения используются два лазерных генератора настроенных на длины волн генерации  $\lambda_1=3,3922$  мкм и  $\lambda_2=3,3912$  мкм и выходными мощностями  $P_1=10$  мВт и  $P_2=5$  мВт соответственно. Сформированное излучение с генераторов поступает на усилители 1 и 2 соответственно, после прохождения которых мощности излучения по двум длинам волн составляют  $P_1=20$  мВт и  $P_2=10$  мВт соответственно [34].

Затем излучение поступает на модулятор, ламели которого расположены таким образом, чтобы сформировать на выходе последовательность чередующихся квазипрямоугольных импульсов по двум длинам волн с отличающейся амплитудой (рисунок 3.2).

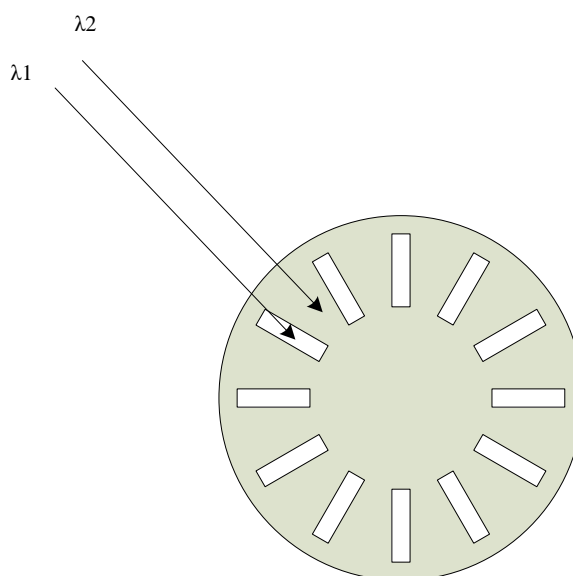


Рисунок 3.2 – Схематичное изображение барабана модулятора с 12 ламелями, позволяющего получить сигналы в противофазе с частотой 3400 Гц. При скорости вращения 200 об/с

Частота модуляции составляет 3400 Гц и задается при помощи блока управления модулятора. Излучение направляется оптической системой на отражающий объект, в данном случае облако газа.

Часть отраженного излучения улавливается приемным телескопом и фокусируется на приемном фотозэлементе. При этом возникает переменный электрический сигнал, величина которого пропорциональна разности мощностей принятых импульсов излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (рисунок 3.3).

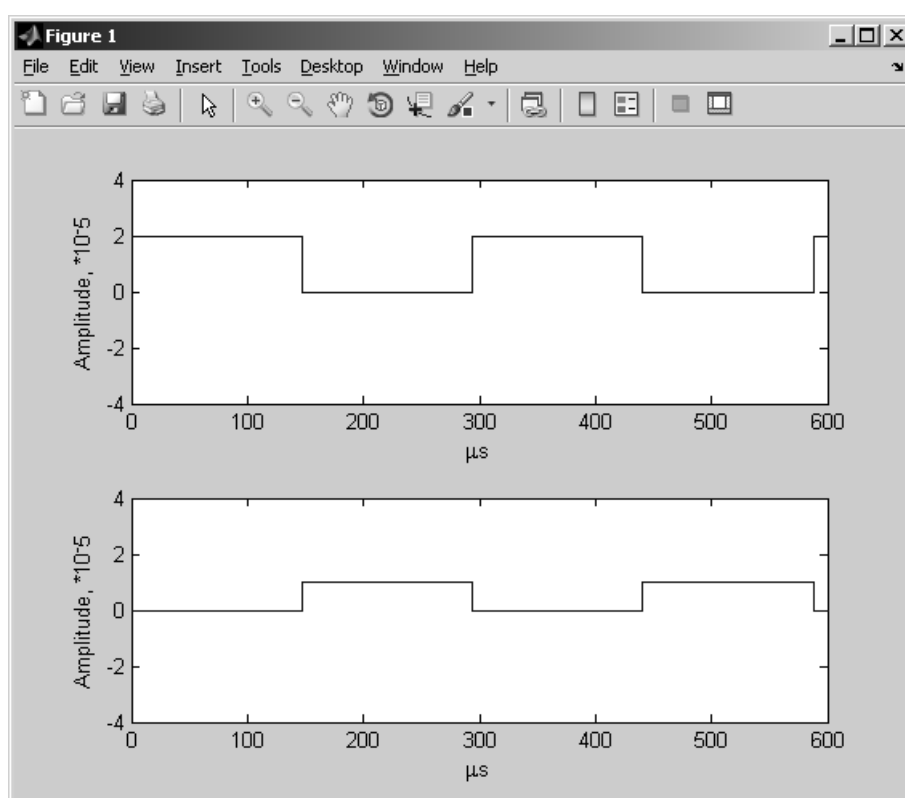


Рисунок 3.3 – Форма сигналов после модулятора. Верхний график отражает сигнал с мощностью 20 мВт, нижний сигнал с мощностью 10 мВт. Частота модуляции 3400 Гц (период 294 мкс)

Основные характеристики, такие как коэффициенты рассеивания и поглощения при прохождении в атмосфере для двух сигналов с близкими длинами волн одинаковы, а, следовательно, не будут являться помехой при сравнении сигналов. При сравнительно малом содержании метана на пути

лазерных лучей сигнал с фотоприемника будет представлять собой последовательность чередующихся импульсов разной амплитуды, аналогичную последовательности излучаемых импульсов.

Оптическая ось объектива приемного телескопа пересекается с плоскостью, проходящей через оси распространения лазерных пучков на расстоянии 50 м от объектива. Таким образом, в диапазоне рабочих расстояний до отражающей поверхности (30-70 м) несовпадение поля зрения объектива и пятна засветки минимально. При зондировании с расстояния 50 метров от отражающей поверхности пятна засветки обоих сигналов будут приблизительно равны 30 см, при этом расстояния от центров пятен будет около 7,5 см (рисунок 3.4).

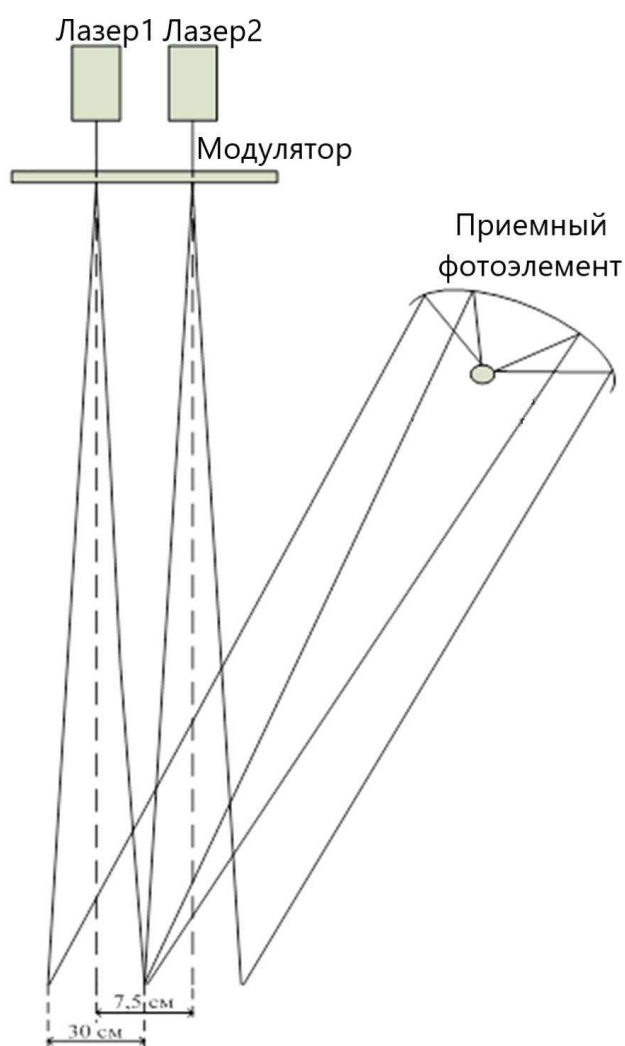


Рисунок 3.4 – Схематичное изображение трассы сигналов от модулятора до фоторезисторов

Разрабатываемая электронная часть схемы приемного фотоэлемента состоит из: приемника, который включает в себя фоторезистор и каскад усиления на основе операционных усилителей, предназначенный для фильтрации и повышения амплитуды сигнала.

### 3.2 Структурная схема приемного устройства

На рисунке 3.5 изображена разработанная структурная схема электроники приемного тракта лабораторного демонстратора. Фоторезисторы 1 и 2 предназначены для приема лазерного излучения. При этом на фоторезистор 1 приходит сумма сигналов, прошедших через трассу с лазера 1: рассеянный приземным слоем и атмосферой, и частично поглощенный метаном. На фоторезистор 2 приходит сумма сигналов, прошедших через трассу с лазера 2: рассеянный приземным слоем и атмосферой. Выходной сигнал фоторезисторов пропорционален мощности принятого лазерного излучения.

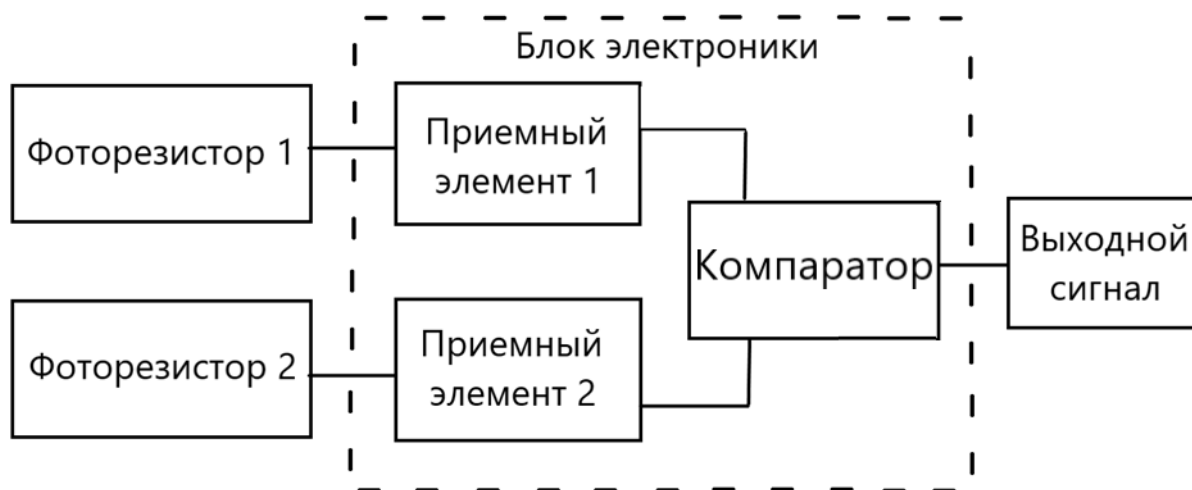


Рисунок 3.5 – Структурная схема разрабатываемого блока аппаратуры

Блок электроники состоит из двух приемников и компаратора. В приемниках происходит начальное усиление сигнала, при этом задаются коэффициенты усиления и выполняется фильтрация сигнала.

Компаратор предназначен для сравнения сигналов. Выходным сигналом, при этом является импульс, амплитуда которого несет информацию о наличии определенной концентрации метана.

### **3.3 Модель приемного устройства**

При разработке модели приемной аппаратуры был рассмотрен однокаскадный усилитель для проверки режимов функционирования приемного датчика – фоторезистора. В этом случае значение сопротивления фоторезистора было постоянным. В пакете прикладных программ MicroCap разработана схема однокаскадного усилителя-приемника входного сигнала (рисунок 3.6).

В состав приемника входит фоторезистор для регистрации излучения, рассеянного отражающей поверхностью. При моделировании в качестве источника переменного сопротивления фоторезистора используется (R2), сопротивление которого изменяли в расчетном диапазоне, соответствующим данным, полученным в Главе 2.

Также в состав узла входит малошумный ОУ (X1), обеспечивающий начальное усиление принимаемого сигнала.

Для обеспечения максимальной чувствительности, питание ОУ двуполярное с амплитудой 30В от -15В до 15В. При этом фоторезистор запитан от внешнего источника напряжением в +5В.

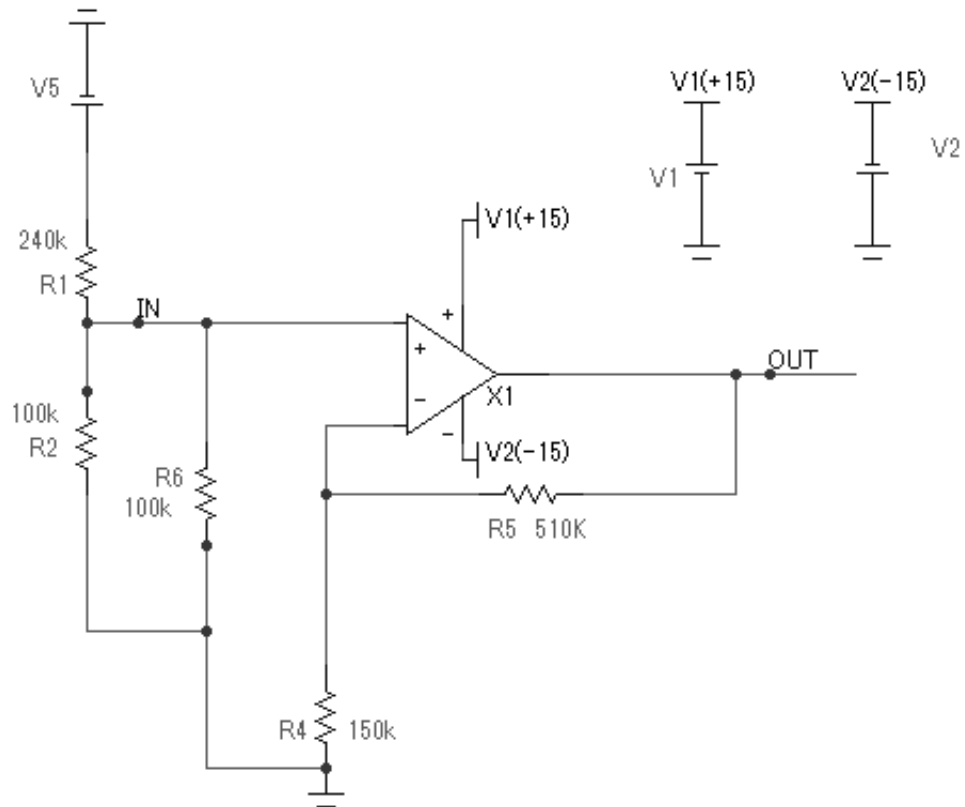


Рисунок 3.6 – Схема однокаскадного усилителя для системы приема сигнала лазера

При моделировании использовали не инвертирующую схему включения ОУ. В данном случае коэффициент усиления  $K_u$  не зависит от собственной характеристики ОУ и рассчитывается согласно выражения (3.1):

$$K_u = 1 + \frac{R_5}{R_4} \tag{3.1}$$

В процессе моделирования подбирались комбинации номиналов сопротивлений резисторов. При этом удалось подобрать соотношение, позволяющее получить необходимый коэффициент усиления. При подборе был учтен диапазон изменений сопротивления резистора R2. Также при моделировании, за счет подбора параметров схемы был исключен режим

компаратора – то есть напряжение на выходе ОУ изменялось согласно изменению сопротивления фоторезистора R2.

### 3.3.1 Выбор датчика

Весомую роль в разработке программно-аппаратного комплекса играет правильный подбор приёмного датчика. Именно от него зависит то, насколько точной будет составлена карта локализации углеводородов. На основании полученных на предыдущих этапах исследования результатах, был сформулирован перечень основных требований к датчику отраженного лазерного излучения. Так, при выборе модели датчика необходимо учесть следующее:

а) Датчики, работающие в более узком ИК-диапазоне, подвержены меньшей засветке относительно солнечного излучения (рисунок 3.7);

б) Максимум спектральной характеристики должен находиться как можно ближе к 3,39 мкм;

с) Датчики, имеющие максимальную чувствительность, являются наиболее эффективными для поставленной задачи.

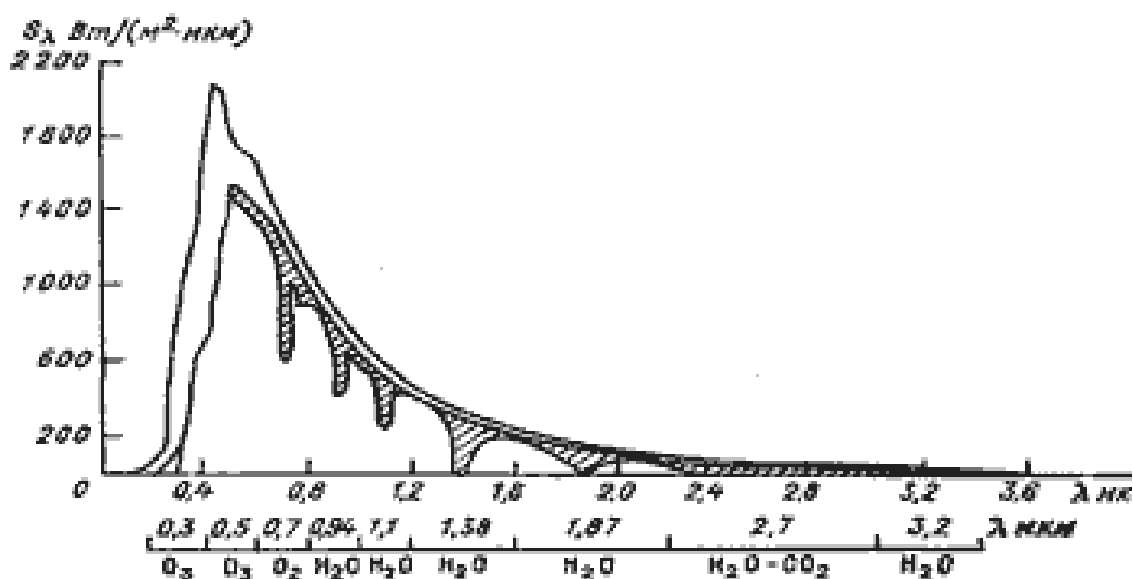


Рисунок 3.7 – Поглощение атмосферой солнечного излучения [4]



Большое количество фоточувствительных элементов приемников (ФЭП) ИК-излучения, на сегодняшний день составляют фоторезисторы, фотодиоды и так называемые фотогальванические приемники (ФГП), которые являются разновидностью фотодиодов.

Большинство неохлаждаемых ФЭП располагаются в пластмассовых или металлостеклянных герметичных корпусах. Входные окна приборов могут изготавливаться из оптического стекла и просветленных германия или кремния.

Определенная часть фотоприёмников выпускается в бескорпусном исполнении. В этом случае ФЭП защищается пленкой лака. Выводы отсутствуют, что обязывает потребителя использовать прижимные контакты к фоточувствительной площадке. Из бескорпусных ФЭП можно формировать линейные и матричные структуры.

ФЭП для специального применения, например ФСА-6, представляют собой плоскую шайбу с отверстием, через которое излучение поступает на отражающую поверхность, что дает возможность устанавливать прибор на близком расстоянии от контролируемого объекта.

Особую группу современных фотоприемников представляют так называемые фотоприемные устройства (ФПУ). ФПУ состоит из одного или множества ФЭП и схем предварительной обработки фотосигнала (например, схем сопряжения, усиления, коммутации, стабилизации рабочей точки и др.), объединенных в едином корпусе. В комплект ФПУ входят также устройства охлаждения ФЭП.

Более сложным современным фотоприёмником является так называемый фотоэлектронный модуль (ФЭМ). В состав ФЭМ могут входить: охлаждаемая многоэлементная структура, охлаждаемый мультиплексор и предусилитель, вторичные источники питания, а также микрокриогенная система охлаждения ФЭП.

В результате анализа неохлаждаемых фоторезисторов был составлен перечень датчиков, удовлетворяющих заданным ограничениям (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Неохлаждаемые фоторезисторы

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{max}$ , мкм	U, В	R, Мом	$\tau$ , мкс	УОС, $C_m * \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} * B_T^{-1}$	$\Delta T$ , С	Размеры, мм	Масса, г
ФР1-38-1-2x2	1.0-4.5	3.8±0.2	5	0.02-0.25	2-10	(0.8-1.8)*10 <sup>10</sup>	-55...	8.4x4	4 (рис. 3.8)
ФР1-38-1-3x3		3.8±0.2	8			(0.8-1.8)*10 <sup>10</sup>	+55		
ФР-611	2.7-4.2	3.6	5	0.08-03	25	(0.8-2)*10 <sup>10</sup>	-60...+55	7.8x11	4(рис. 3.9)
ФР3-1/20	1-5.5	4.3±0.2	12	0.06-0.3	2-4	(2-5)*10 <sup>8</sup>	-60...+60	7.4x3	1(рис. 3.10)

На рисунках 3.8 – 3.10 представлены диаграммы спектральной характеристики элементов. Анализ графиков показал, что из всех неохлажденных фоторезисторов наиболее чувствительным является ФР-611.

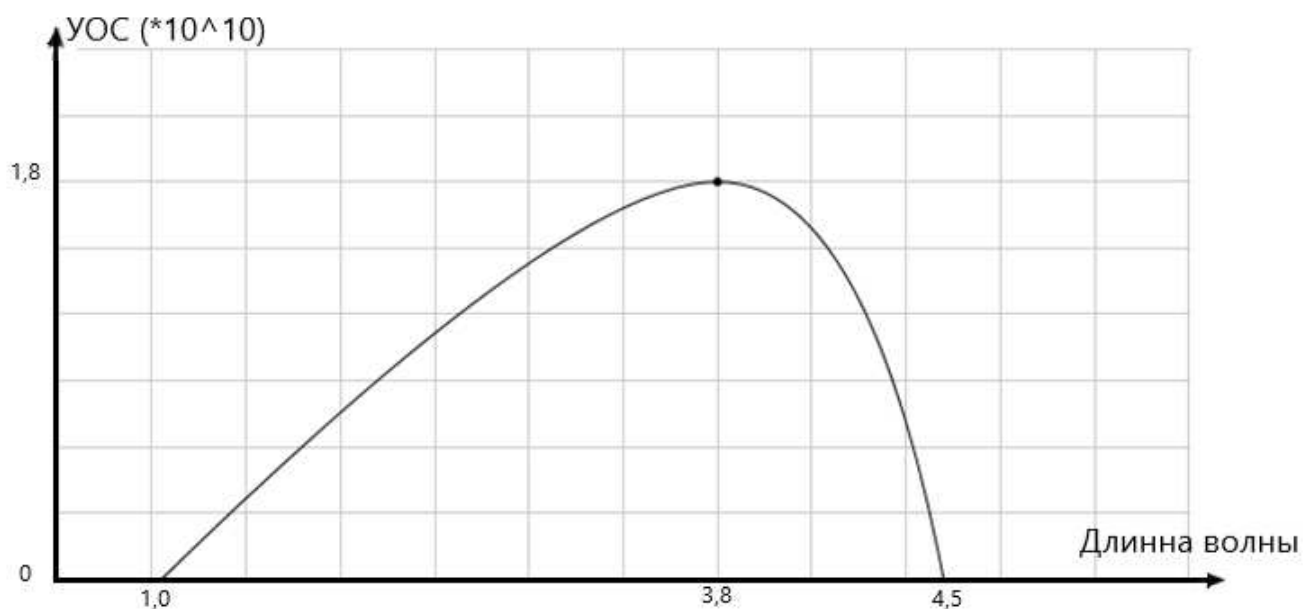


Рисунок 3.8 – УОС ФР1-38-1-2x2 (3x3)

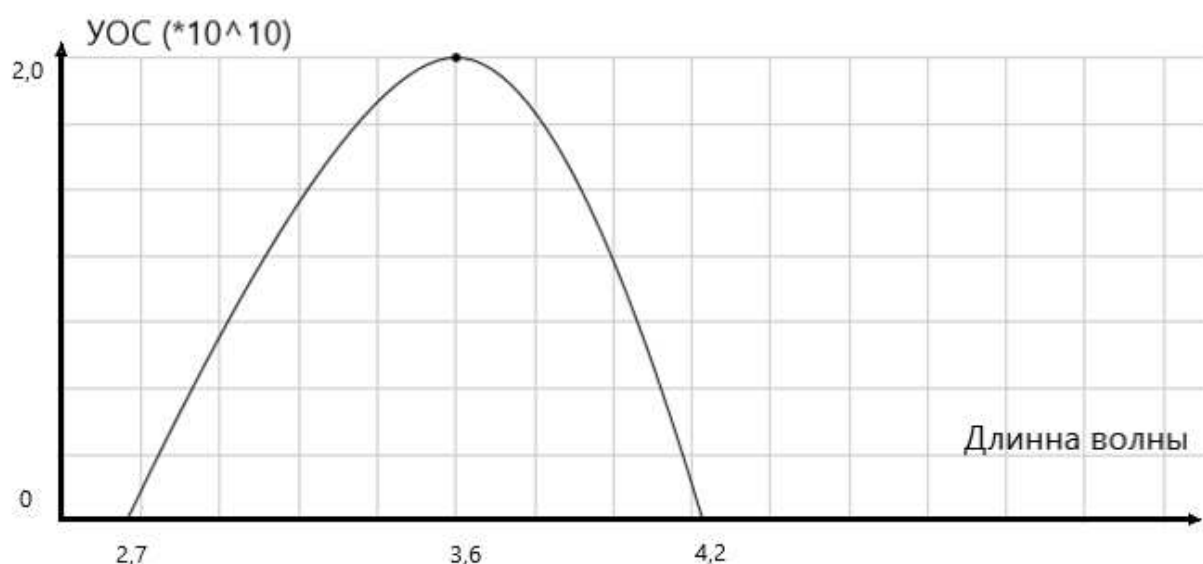


Рисунок 3.9 – УОС ФР-611

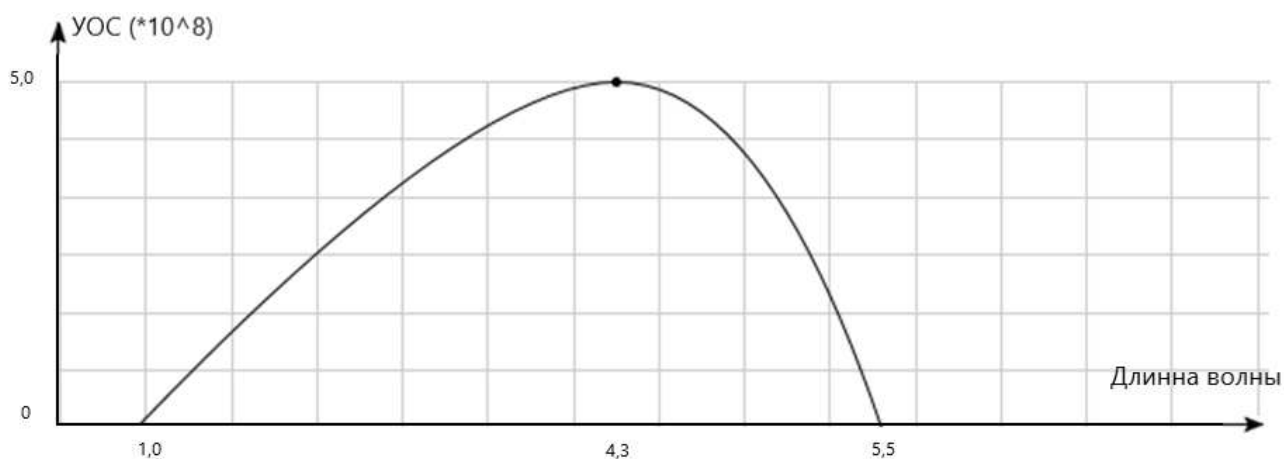


Рисунок 3.10 – УОС ФР3-1/20

Также существуют охлаждаемые фотоприемники, которые определяются разными способам охлаждения ФЭП. Существует три основных способа охлаждения ФЭП:

а) при помощи термоэлектрического микроохладителя (ТЭО), в качестве которого используется элемент Пельтье;

б) при помощи жидких хладагентов, в качестве которых используются сжиженные газы (азот, кислород, гелий и др.);

с) при помощи сжатых газов (фреон, азот, кислород, водород, гелий) или их смесей.

Малоформатные фотоприёмники (содержащие от 1 до 4 ФЭП), охлаждаемые при помощи ТЭО, обычно располагаются в металлостеклянных корпусах. При этом ФЭП размещается непосредственно на «холодной» плоскости ТЭО [35].

ТЭО способен снизить температуру ФЭП на 30–40°К относительно температуры окружающей среды. Рабочий ток ТЭО в зависимости от конструкции и количества каскадов составляет от 50 до 1000 мА при напряжении от 3 до 6 В. Время выхода на рабочий режим – от 1 до 10 мин. ТЭО не допускают переплюсовки питания. Многоэлементные фотоприёмники, как правило, используют многокаскадные ТЭО и размещаются в корпусах специальной конструкции [35].

При использовании термоэлектрических устройств для охлаждения ФЭП необходимо обеспечить теплоотвод от «горячей» плоскости ТЭО.

Фотоприемники, охлаждаемые жидким хладагентом, имеют специальное пространство для его размещения. Температура ФЭП определяется видом используемого хладагента. В основном, в качестве хладагента используется жидкий азот, с температурой кипения 77°К. Время выхода на режим таких приборов составляет не более 30 мин, а время непрерывной работы при однократной заливке хладагентом может достигать 4 ч. Стоит заметить, что включение приборов в электрическую схему без охлаждения ФЭП. Не допускается.

Конструкция фотоприемника, используемого газообразный хладагент, имеет специальное место для размещения дроссельного микротеплообменника. Температура ФЭП определяется видом используемого газа. Зачастую в качестве хладагента используется жидкий азот с температурой кипения 77°К. Время выхода на режим составляет от 1 до 10 мин, время непрерывной работы определяется способом подачи газа. Стоит заметить, что включение приборов в электрическую схему без охлаждения ФЭП. Не допускается. Входные окна охлаждаемых

фотоприёмников, как правило, изготавливаются из просветленных германия, кремния или оптической керамики.

Результаты проведенного анализа охлаждаемых ФЭП представлены в таблицах 3.2-3.5.

Таблица 3.2 – Охлаждаемые фоторезисторы

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , мкм	U, В	R, Ом	$\tau$ , мкс	УОС, $C_M \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} \cdot B_T^{-1}$	УОС в $\Delta\lambda_{\max}$	$\Delta T$ , С	Размеры, мм	Масса, г
ФР2-34-1-2x2	1.0-	$3.6 \pm 0.2$	5	0.03-0.4	6-10	$(2.5-4) \cdot 10^9$	$(0.3-4.8) \cdot 10^9$	-40	15.2x8	8 (рис. 3.11)
ФР2-34-1-3x3	4.2	$3.6 \pm 0.2$	8					...		
ФР-127 БМ-01	2.7-4.2	$3.6 \pm 0.2$	15	3.5	15	$1.2 \cdot 10^{10}$	-----	-50 ... +60	-----	9 (рис. 3.9)
УФРО2	2.6-4.8	$3.4 \pm 0.2$	30	4	50	$3 \cdot 10^{10}$	$(1 \dots 3.0) \cdot 10^{10}$	-40 ... +50	-----	30 (рис. 3.12)

На рисунках 3.9, 3.11, 3.12 представлены диаграммы спектральной характеристики охлаждаемых фоторезисторов. Анализ графиков показал, что из всех элементов наиболее чувствительным является УФРО2. Кроме того данный элемент имеет двухкаскадное охлаждение, что гарантирует более высокую обнаружительную способность

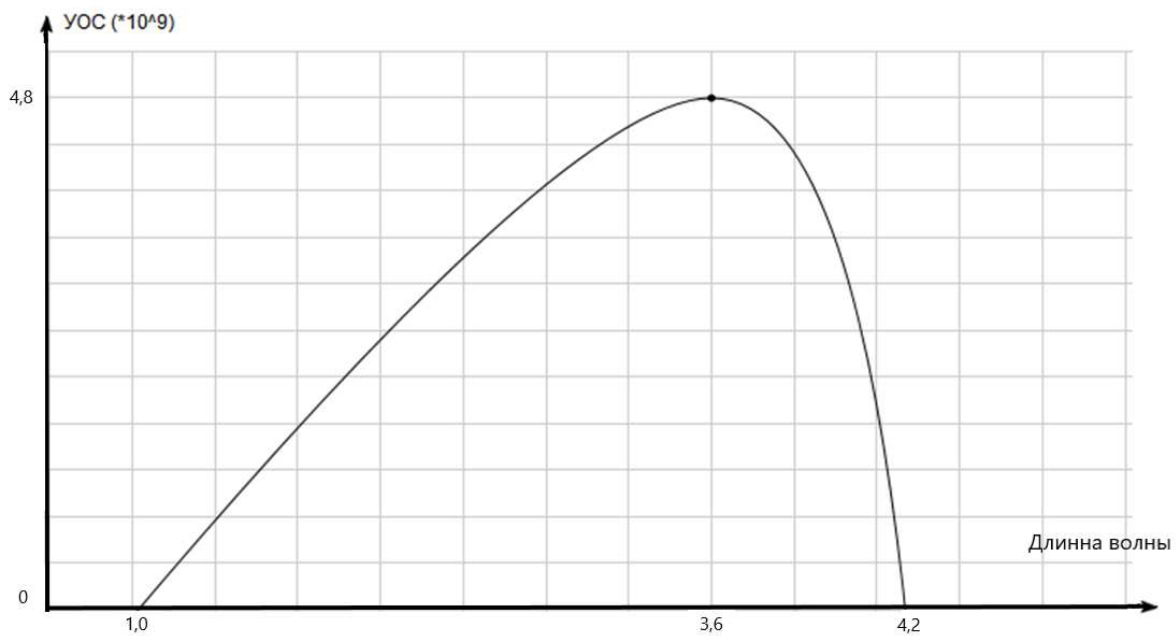


Рисунок 3.11 – УОС ФР2-34-1-2x2(3x3)

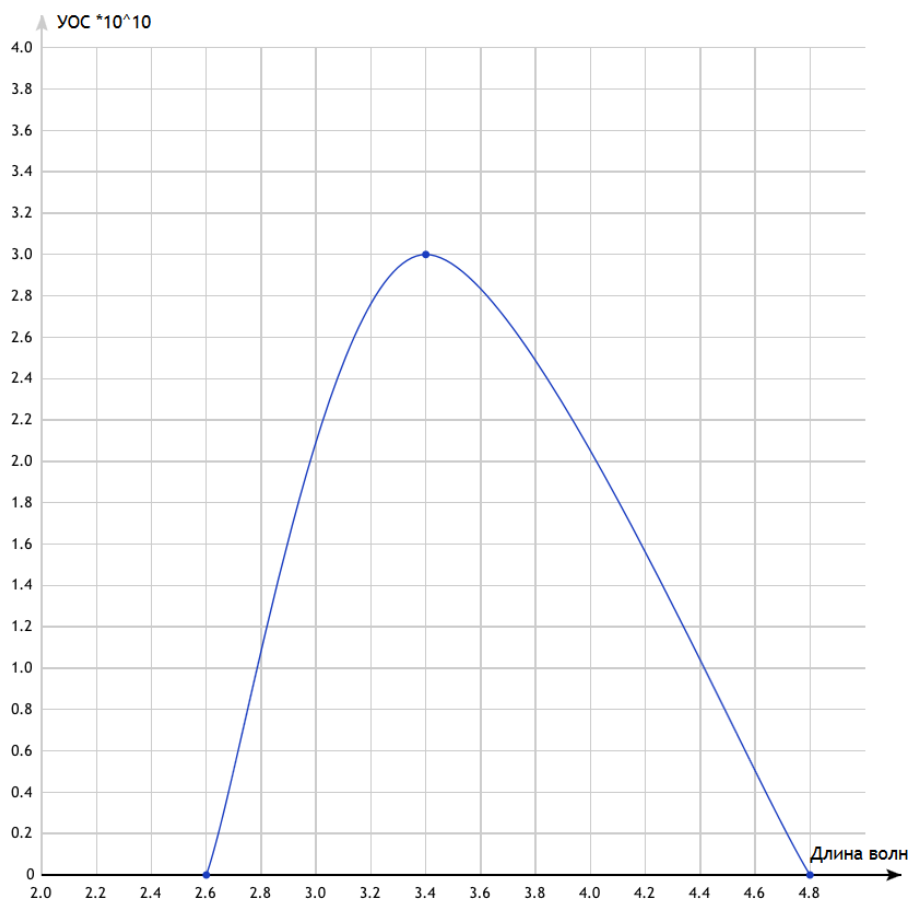


Рисунок 3.12 – УОС УФР02

Таблица 3.3 – Многоэлементные охлаждаемые фоторезисторы

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , мкм	К-во ф.ч.э.	U, В	R, Мом	$\tau$ , мкс	УОС, $C_m * \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} * B_T^{-1}$	$\Delta T$ , С	Размеры, мм	Масса, г
АП-РЛ-407	1.5-5	3.8-4.2	48	До 5	0.1-10	50	$3 * 10^{10}$	-60...+55	53x46	125 (рис. 3.13)
ФР164	1-5.0	-----	24x2	5	1-10	50	$3.5 * 10^{10}$	196*	-----	130
ФР-АРЫК	1-	4.2	48	5.4-	1-15	25-	(3-4.5)* $10^{10}$	195*	55x60	130 (рис. 3.14)
ФР-АРЫК2	5.5	4.2	64	6		50	(3-4.5)* $10^{10}$			

\*195(6)К – режим термостабилизации

На рисунках 3.13 – 3.16 представлены диаграммы спектральной характеристики многоэлементных охлаждаемых фоторезисторов (рисунки 3.13, 3.14) и многоканальные охлаждаемые фотоприёмные устройства (рисунки 3.15, 3.16). Анализ графиков показал, что данные элементы обладают наивысшей чувствительностью. Тем не менее они достаточно громоздки и тяжелы для применения в составе полезной нагрузки БПЛА. Кроме того, в состав таких многоэлементных приборов входит большое количество ф.ч.э., что сильно усложняет систему и может привести к непредвиденным отказам.

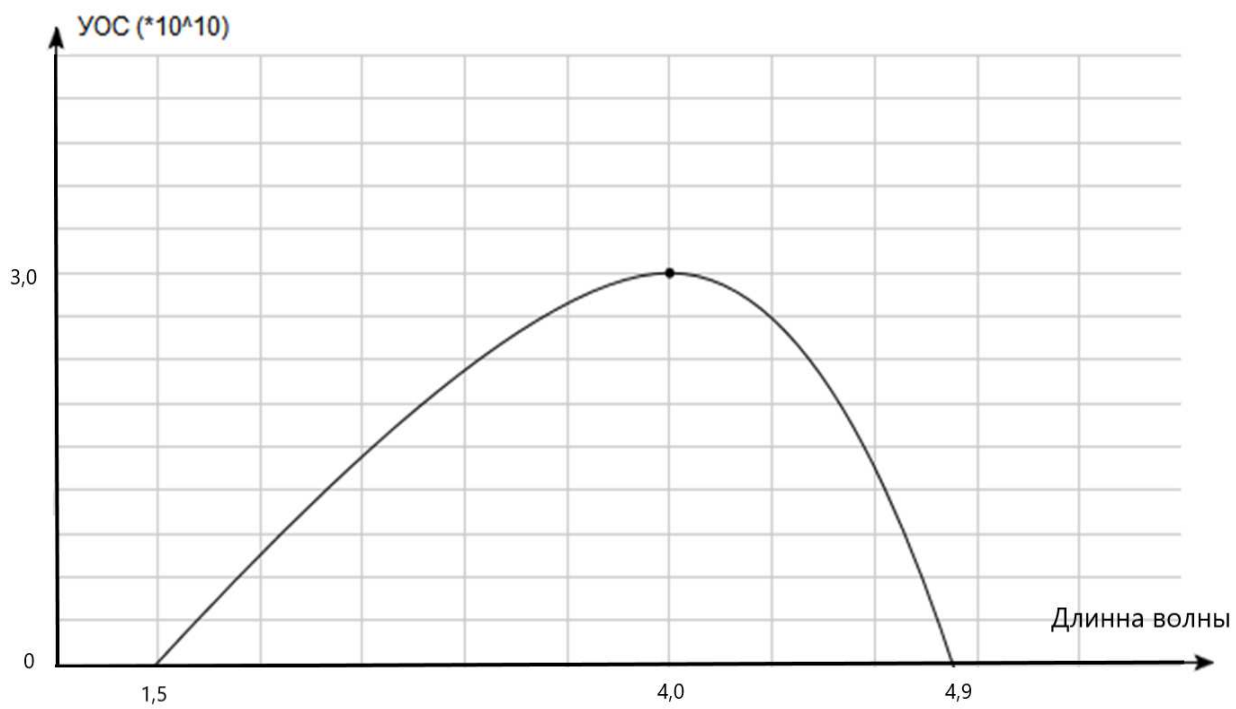


Рисунок 3.13 – УОС АП-РЛ-407

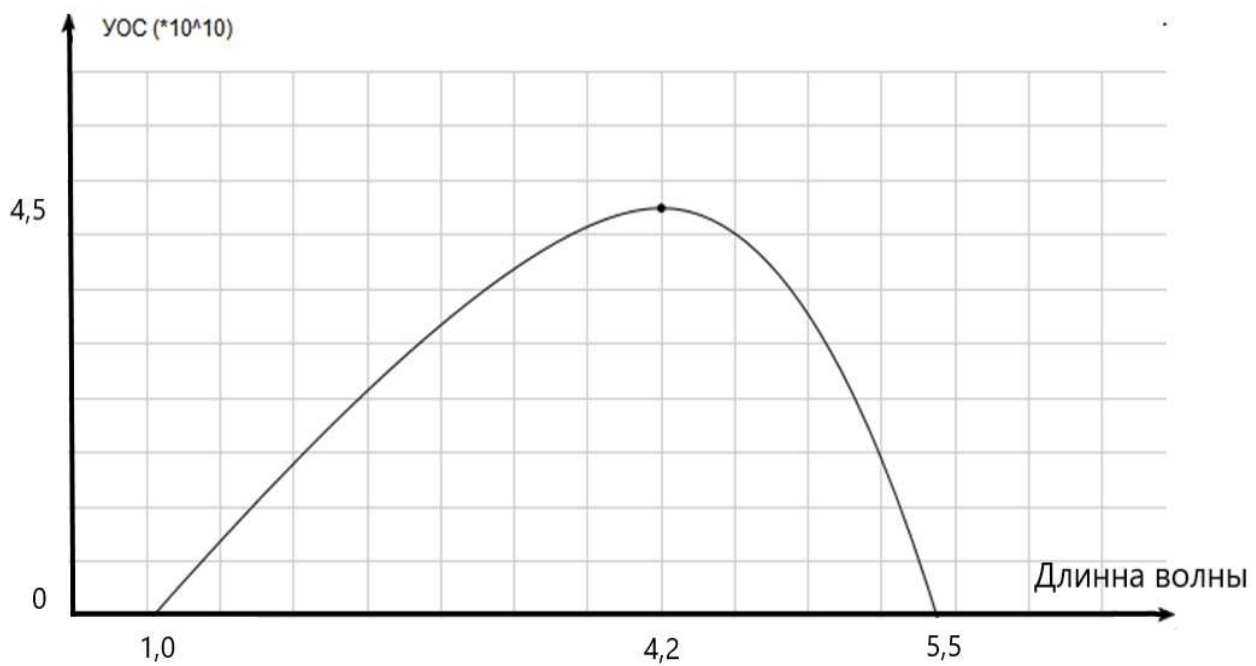


Рисунок 3.14 – УОС ФР-АРЫК 1 и 2



Таблица 3.4 – Многоканальные охлаждаемые фотоприёмные устройства

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , мкм	К-во ф.ч.э.	U, В	$t$ , мкс	УОС, $C_M * \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} * B_T^{-1}$	УОС в $\Delta\lambda_{\max}$	$\Delta T$ , С	Размеры, мм	Масса, г
ФУР663А	1.6-4.9	3.4±2	16	±10	50	$5 * 10^9$	$7.5 * 10^{10}$	-60 ... +60	100x30	300 (рис. 3.15 и 3.16)
ФУР663Б		3.4±2	32			$5 * 10^9$	$7.5 * 10^{10}$		100x41	
ФУР663В		3.4±2	48			$5 * 10^9$	$7.5 * 10^{10}$		100x54	
ФУР664А	1.6-5.2	3.8±2	16		15	$5 * 10^9$	$4.8 * 10^{10}$		100x30	
ФУР664Б		3.8±2	32			$5 * 10^9$	$4.8 * 10^{10}$		100x41	
ФУР664В		3.8±2	48			$5 * 10^9$	$4.8 * 10^{10}$		100x54	



Рисунок 3.15 – УОС ФУР663 А, Б и В

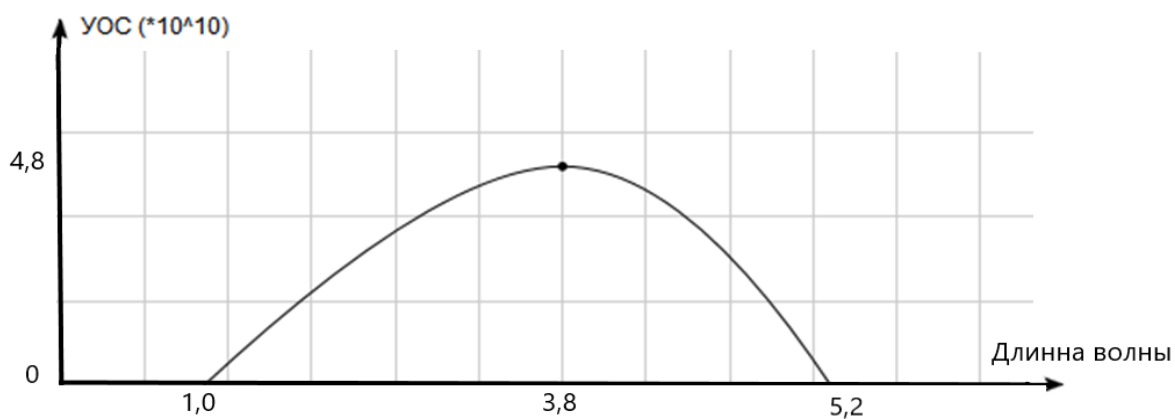


Рисунок 3.16 – УОС ФУР664 А, Б и В

Таблица 3.5 – Охлаждаемые фотоприёмные устройства

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , Мкм	К-во ф.ч.э.	U, В	$t$ , мкс	УОС, $C_m \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} \cdot B^{-1}$	УОС в $\Delta\lambda_{\max}$	$\Delta T$ , С	Размеры, мм	Масса, г
Планета	1.8-4.7	-----	128	15	50	-----	$1 \cdot 10^{10}$	240*	58x70	-----
Спектр	1-4.8	-----	1	10-15		-----	$7 \cdot 10^{10}$	293*	8x11,5	-----

\*К – режим термостабилизации

ИК направление представлено приборами на основе диодов с барьером Шоттки. Матричный ИК-ПЗС представляет собой монолитный прибор с зарядовой связью со строчно-кадровым переносом и объемным каналом. Фоточувствительная секция прибора выполнена на основе диодов с барьером Шоттки из силицида платины (PtSi/Si). Считывание информации с фоточувствительного массива осуществляется с помощью вертикальных и горизонтального ПЗС регистров, имеющих 4-х-или 3-х фазную организацию. Спектральный диапазон чувствительности этих приборов 1-5 мкм (рисунок 3.17), рабочая температура 80К. Основные параметры ИК ПЗС представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – ФПЗС

Тип прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , Мкм	Количество ФЭП	$\Delta T$ , С
ELCM1090	1-5	-----	480x 320	80*
ELCM1091	1-5	-----	320x 240	80*

\* режим термостабилизации

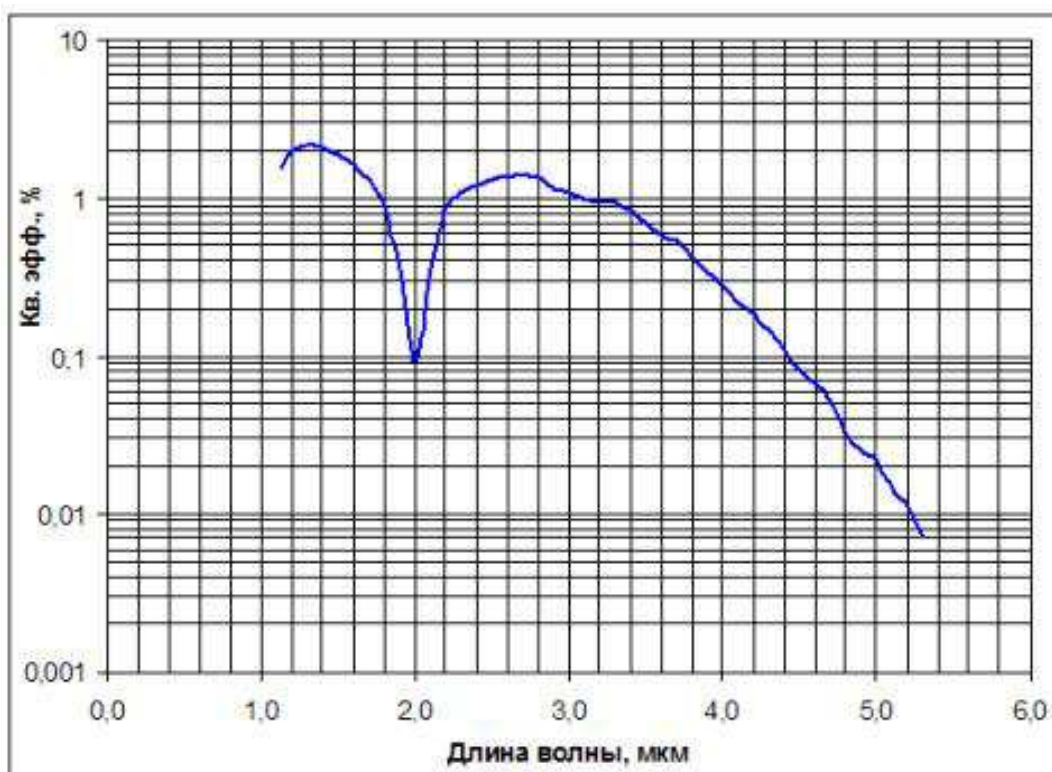


Рисунок 3.17 – Квантовая эффективность ELСМ1090-1091

### 3.3.2 Результаты анализа

В ходе работы над фотоприемниками для регистрации средневолнового и длинноволнового ИК-излучения (диапазон 1.5-15 мкм) было проанализировано свыше 600 датчиков разных типов, от неохлаждаемых фоторезисторов и гальванических элементов до многоканальных охлаждаемых фотоприемных устройств и фотоэлектронных модулей. В результате анализа хорошо показали себя фоторезисторы: достаточно доступные и неприхотливые элементы, с широким диапазоном рабочих характеристик. С другой стороны существуют многоэлементные фотоприемные устройства, которые содержат в себе большое количество приёмных элементов, как следствие, улучшающих качество полученного сигнала. К сожалению, большинство таких фотоприемных устройств по своему функциональному назначению избыточны, что ведет к усложнению приемного устройства и, как следствие, увеличению рисков по надежности

при эксплуатации на борту летательного аппарата. На основании вышеизложенного принято решение выбирать датчик из числа фоторезисторов (ФР).

Сформирован перечень датчиков, наиболее полно удовлетворяющих условиям задачи поиска метана, в разрезе сформулированных требований (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Выбранные датчики для приемного тракта

Наименование прибора	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda_{\max}$ , мкм	Кол-во ФЭП	УОС, $C_m * \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} * B_T^{-1}$
ELCM1090	1-5	—	480x320	—
ELCM1091	1-5	—	320x240	—
УФРО2	2.6-2.8	3.4±0.2	1	3*10 <sup>10</sup>
ФР611	2.7-4.2	3.6	—	(0.8-2)*10 <sup>10</sup>

В таблице 3.7 представлен перечень датчиков, в число которых входит 2-е ФПЗС-матрицы и 3 фоторезистора. Основным минусом матриц является их невысокая квантовая эффективность (менее 10%), что ставит под сомнение достижение требуемой чувствительности в лётных условиях. Учитывая широкий диапазон работы (от 1 до 5 мкм), высока вероятность, что в лётных условиях результат будет выдавать засветку по солнечному излучению, от чего появятся ложные срабатывания.

Было принято решение выбрать УФРО2 (Рисунок 3.18), поскольку этот датчик полностью соответствует расчетным, техническим требованиям проекта и кроме того имеет двухкаскадное охлаждение, что гарантирует более высокую обнаружительную способность.

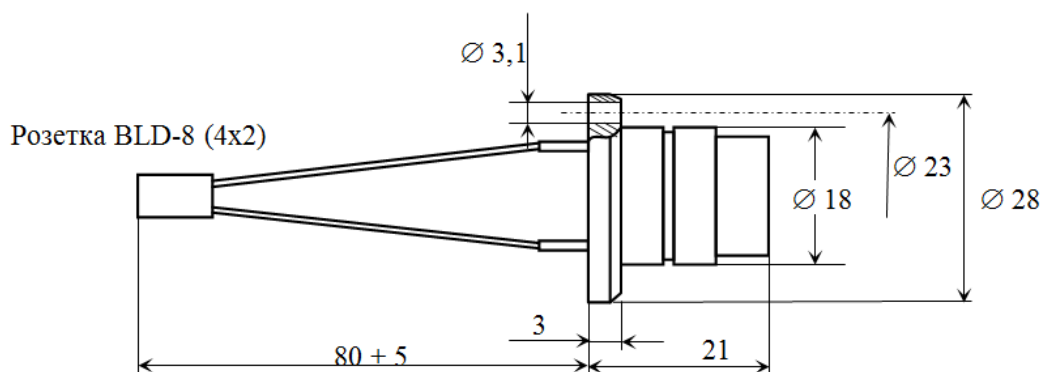


Рисунок 3.18 – Внешний вид и габаритные размеры УФРО2

Для регистрации изменения фотопроводимости ФР его включают в цепь, состоящую из источника напряжения постоянного тока и нагрузочного резистора. При этом сигнал регистрируется как изменение напряжения на нагрузочном резисторе. Для непосредственного применения этот фотосигнал, в большинстве случаев, не пригоден из-за малого значения, поэтому его необходимо усилить, обеспечив при этом максимальное отношение сигнал/шум. Для обеспечения высокой чувствительности разработан перечень основных рекомендаций для проектирования приемного каскада на основе выбранного фоторезистора:

- а) сопротивление резистора нагрузки должно быть равно темновому сопротивлению ФР;
- б) полоса пропускания регистрирующего электронного тракта должна быть минимально возможной;
- в) напряжение шума регистрирующего электронного тракта должно быть меньше напряжения шума ФР не менее, чем в три раза;
- г) ФР и электронный тракт должны быть максимально защищены от воздействия оптических и электрических помех.

Типовые схемы включения ФР приведены на рисунках 3.19-3.21.

Схема на рисунке 3.19 наиболее оптимальна для работы в аппаратуре с однополярным питанием и позволяет обеспечивать высокий коэффициент усиления напряжения фотосигнала.

В данном случае в выходном сигнале присутствует информация о величине постоянного напряжения в точке соединения ФР и резистора нагрузки. Эта информация может быть использована при термостабилизации устройства при выявлении сигнала ошибки.

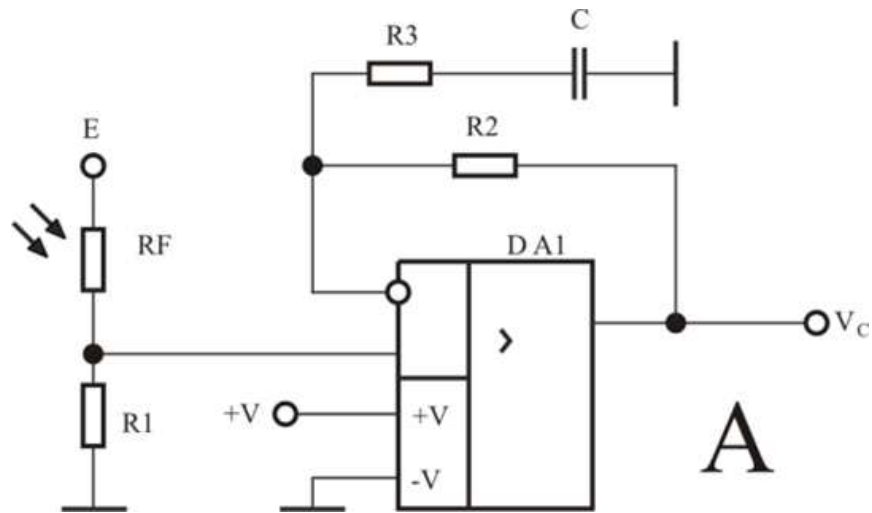


Рисунок 3.19 – Схема включения ФР в аппаратуре с однополярным питанием

При таком включении ФР напряжение выходного сигнала определяется по формуле 3.2:

$$V_c = \Phi \cdot S_v \left( \frac{R_2}{R_3} + 1 \right), \quad (3.2)$$

где  $\Phi$  – поток излучения;

$S_v$  – вольтовая чувствительность.

При этом частота  $f = 2\pi R_3 \cdot C$ .

Схема на рисунке 3.20 предпочтительна для применения в аппаратуре с двухполярным питанием.

Наличие разделительного конденсатора позволяет исключить влияние температурного дрейфа ФР и постоянного фонового излучения на режим работы усилителя.

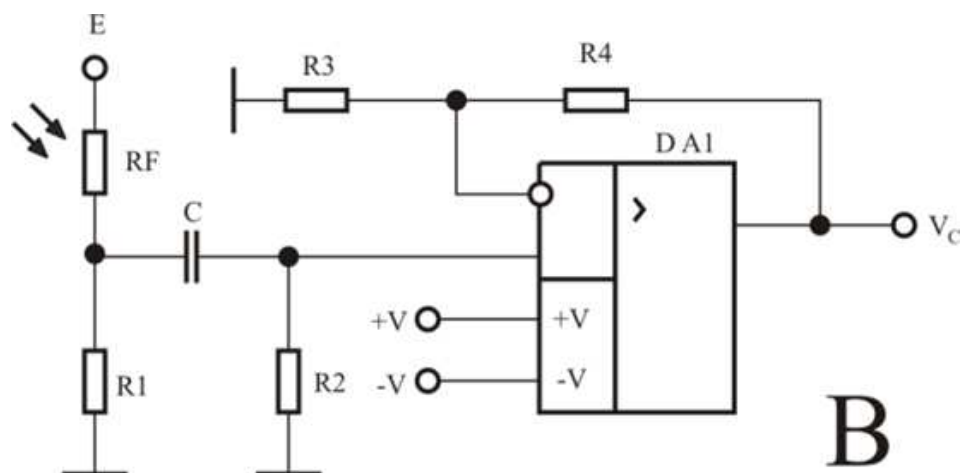


Рисунок 3.20 – Схема включения ФР в аппаратуре с двухполярным питанием

При таком включении ФР напряжение выходного сигнала определяется по формуле 3.3. При этом частота  $f = 2\pi R_2 \cdot C$ .

$$V_c = \Phi \cdot S_v \left( \frac{R_4}{R_3} + 1 \right), \quad (3.3)$$

Схемы на рисунке 3.21 предпочтительны для аппаратуры с двухполярным питанием, работающей в узком диапазоне рабочих температур окружающей среды.

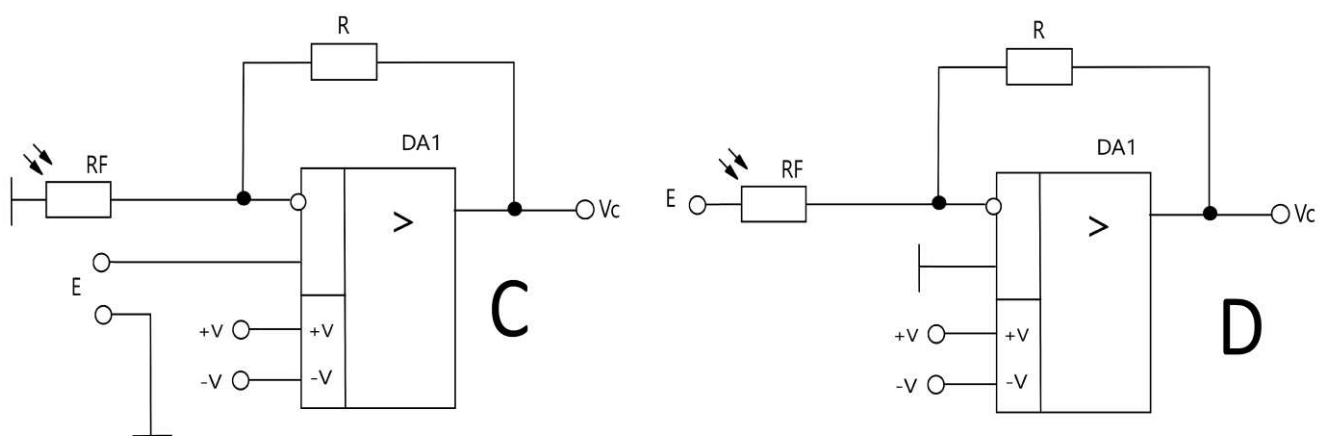


Рисунок 3.21 – Схемы включения ФР в аппаратуре, работающей в узком диапазоне температур

Основное преимущество таких схем – возможность работы с ФР, удаленным от усилителя, при высоких частотах модуляции оптического излучения. Кроме того в этих схемах использован минимум элементов.

При таких способах включения (рисунок 3.21) необходимо выполнять условие  $E < U_{\text{вых.мах}} \cdot RF/R$ .

### 3.4 Модель аппаратуры приемного тракта

Разработана модель датчика – фоторезистора с переменным сопротивлением изменяющимся в зависимости от уровня освещенности. В программе MicroCap моделирование датчика осуществлялось при помощи набора управляемых ключей, отпирающих резисторы. Использовались ключи, с заданным временным интервалом срабатывания. Таким образом происходила имитация нахождения на трассе лидара газового облака.

На основании ранее полученных данных о длительности периода единичного импульса – каждому ключу приписывалось время срабатывания и время закрытия через 294 микросекунды. Всего использовалось по 8 ключей в двух моделях приемников. Данное количество ключей позволяет продемонстрировать работу модели лидара. Для каждого резистора с ключом приемника с приемным фоторезистором высчитывалось своё значение.

После моделирования функционирования лазеров был получен набор мощностей при различных значениях коэффициента ослабления. На основании полученных значений мощности были рассчитаны токи фоторезистора, см. (2.5) и (2.6). Полученные результаты приведены в таблице 3.8.



Таблица 3.8 – Результаты расчетов сопротивлений измерительного тракта

№ расчета	Коэффициент ослабления, $\beta_{\lambda}, м^{-1}$	Мощность рассеянного излучения, $R_{\lambda}, мВт$	Ток, $I, мкА$	Сопротивление фоторезистора, $R, Ом$
1	0.0005	0.0506	0.996	5020100
2	0.002	0.046	0.858	5827500
3	0.004	0.0408	0.702	7122500
4	0.0055	0.0378	0.612	8169900
5	0.019	0.0227	0.159	31446500
6	0.0285	0.0195	0.063	79365100
7	0.041	0.018	0.018	277777800

Для того чтобы результат работы модели был максимально приближен к реальным условиям, при моделировании ключи отпирала сопротивления в заданном порядке (таблица 3.9). Это позволяет имитировать наличие принятого скачкообразного сигнала с наличием метана.

Таблица 3.9 – Соответствие номера замера и порядка следования результата при моделировании

№ расчета	Порядок использования расчета при моделировании
1	1, 8
2	7
3	6
4	2
5	5
6	4
7	3

На рисунке 3.22 приведен фрагмент модели датчика приемного такта.

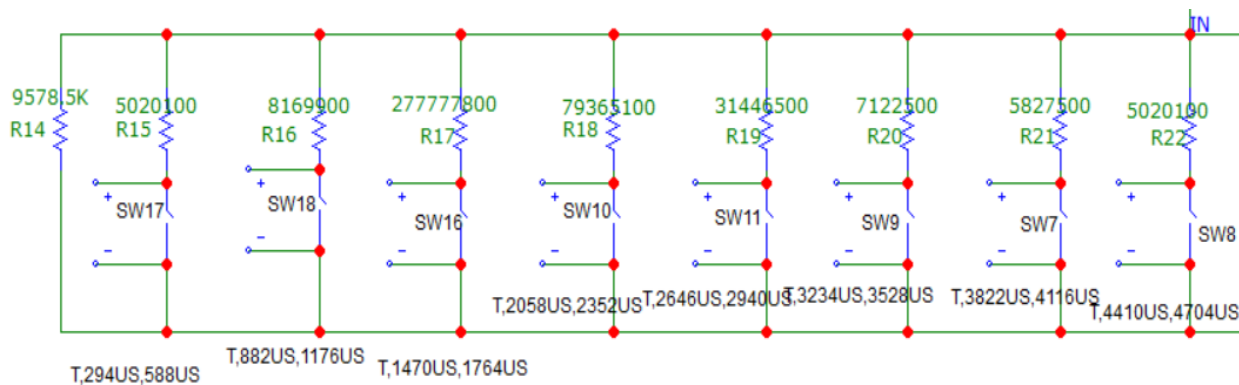


Рисунок 3.22 – Фрагмент модели, в которой реализуются ключи, отпирающие определенное напряжение в определенном порядке для приемного (первого) фоторезистора

На рисунке 3.23 изображена еще одна схема с ключами. Ее отличие от представленной на рисунке 3.22 в том, что попеременно открывающиеся ключи включают в цепь резисторы с одинаковыми напряжениями, имитируя тем самым идеализированные условия чистого сигнала.

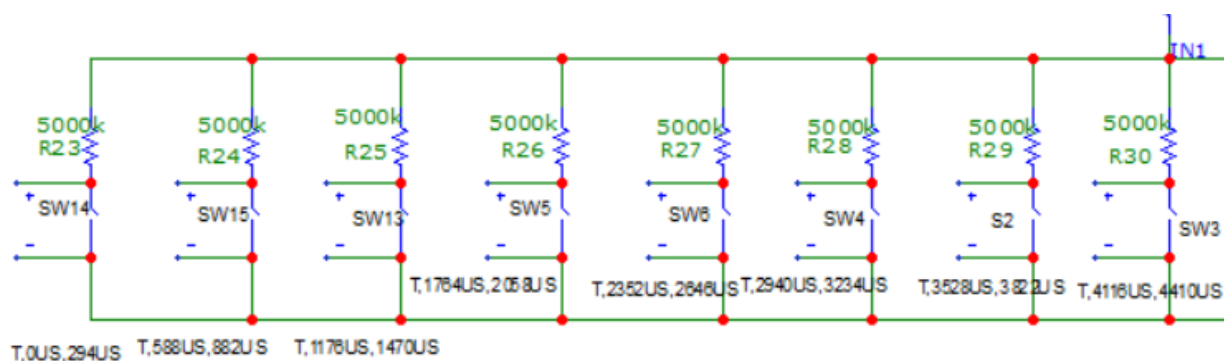


Рисунок 3.23 – Фрагмент модели с ключами для опорного (второго) фоторезистора

На рисунке 3.24 изображен сигнал, поступающий на один из входов операционного усилителя в приемнике. Была симитирована ситуация, при которой фоторезистор генерирует сигнал с большой амплитудой, что означает отсутствие метана, при следующих импульсах сигнал начинает терять амплитуду, что означает появление метана.

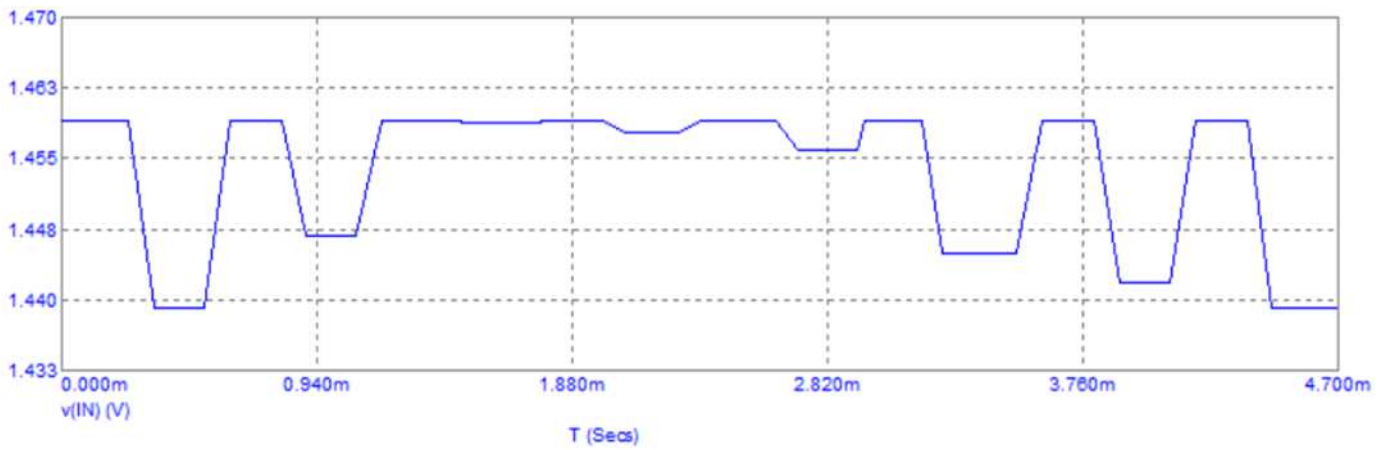


Рисунок 3.24 – Сигнал, полученный в результате части модели с ключами, имитирующей работу приемного (первого) фоторезистора

На опорный фоторезистор поступает сигнал заданной формы, изображенный на рисунке 3.25. Сигнал формируется в противофазе к сигналу с приемного фоторезистора, при этом амплитуда у импульсов совпадает.

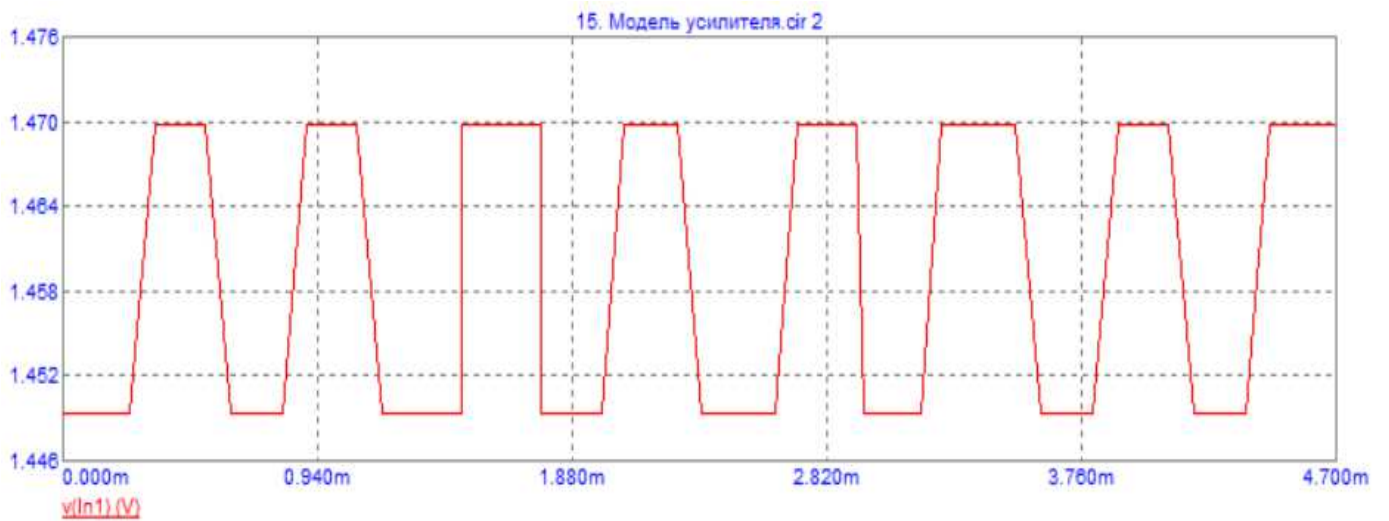


Рисунок 3.25 – Сигнал на опорном (втором) фоторезисторе

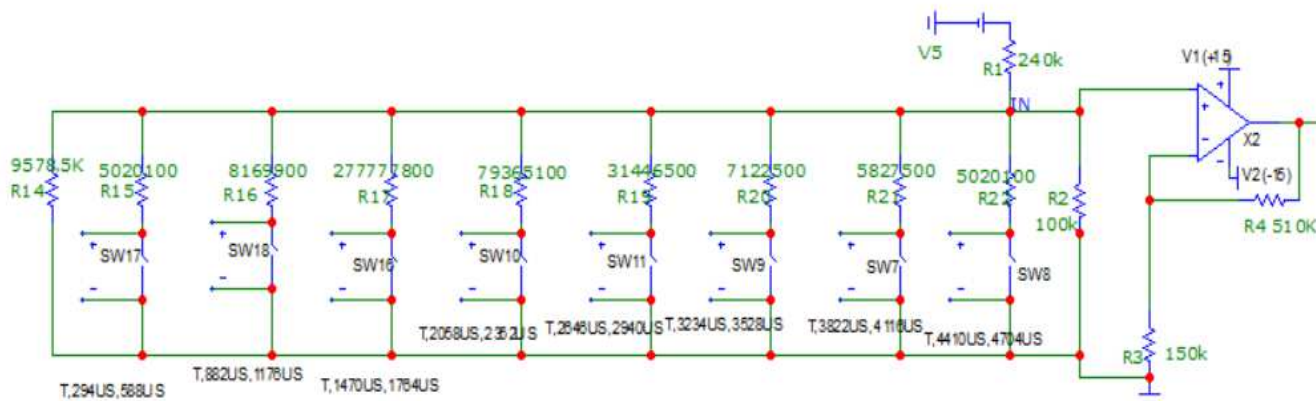


Рисунок 3.26 – Модель приемника с ключами на инвертирующем операционном усилителе

Далее в схемы был добавлен операционный усилитель, на выходе которого (рисунок 3.26) получаем усиленный сигнал (рисунок 3.26).

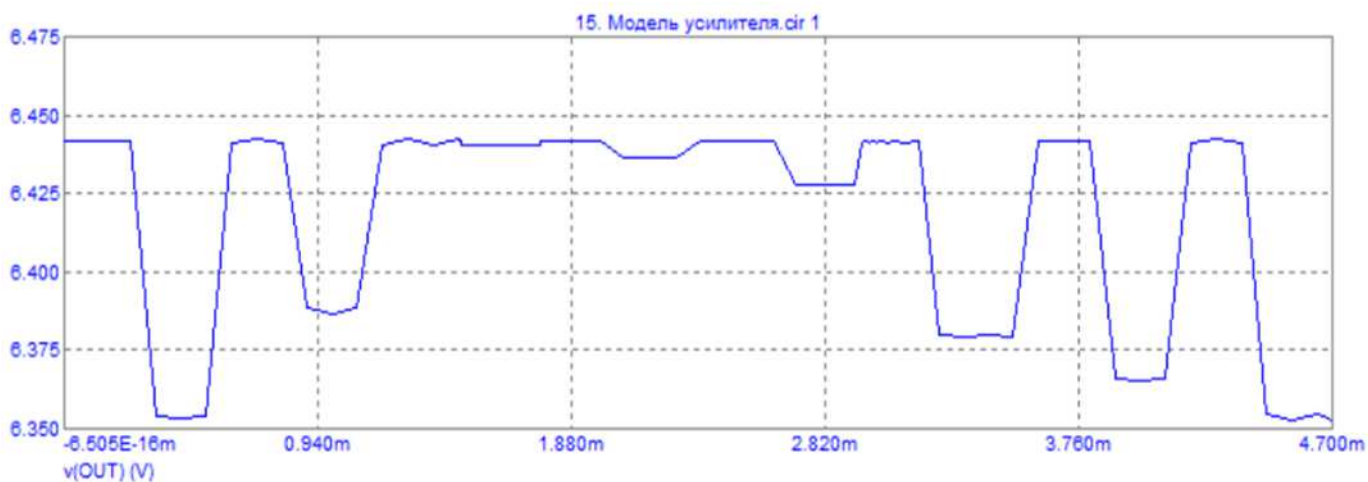


Рисунок 3.27 – Усиленный сигнал с выхода операционного усилителя из схемы приемника приемного (первого) фоторезистора

Усиленный сигнал с выхода операционного усилителя от приемника с опорным фоторезистором изображен на рисунке 3.28.

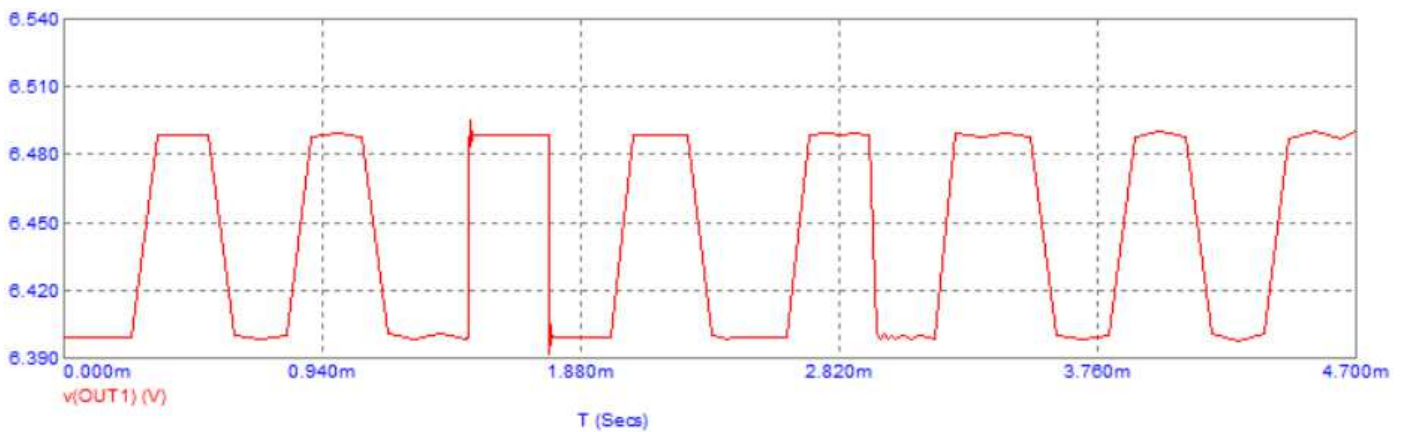


Рисунок 3.28 – Усиленный сигнал с выхода операционного усилителя из схемы приемника опорного фоторезистора

Сигналы, изображенные на рисунках 3.27 и 3.28, поступают на аналоговый сумматор, обозначенный X3 на рисунке 3.29. Модель сумматора – операционный усилитель, на входы которого поступают 2 усиленных сигнала. На выходе аналогового сумматора получим инвертированный сложенный сигнал. Выход сумматора подключен на инвертирующий вход операционного усилителя, работающего в режиме компаратора X4. На выходе компаратора будет максимальное напряжение, в тех случаях, когда напряжение с выхода сумматора будет ниже порога, задаваемого делителем напряжения, реализованного резисторами R12 и R13, это несет информацию о том, что во время данного отчета зафиксировано аномальная концентрация метана в приземном слое [36-37]. На рисунке 3.30 продемонстрирована реакция компаратора на напряжение по значению ниже порогового в виде трех поочередно идущих импульсов.

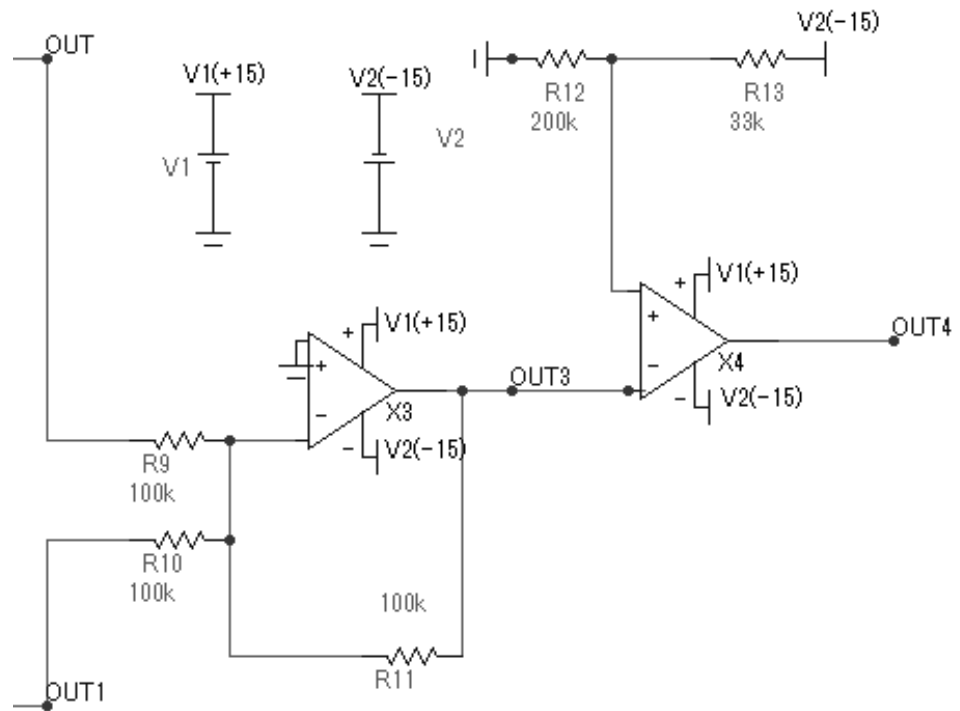


Рисунок 3.29 – Аналоговый сумматор и компаратор

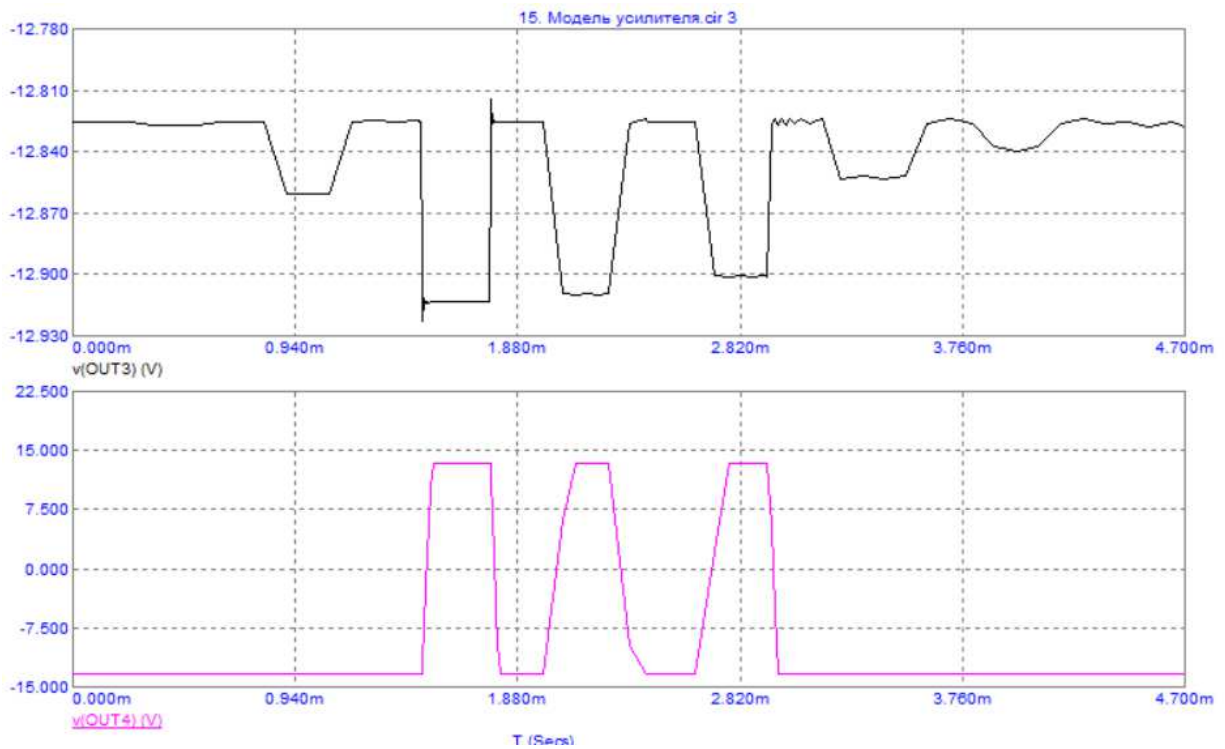


Рисунок 3.30 – Выходы сумматора и компаратора соответственно

### 3.5 Выводы по главе

Разработана функциональная схема, общий принцип работы и алгоритмы взаимодействия элементов установки лидарного зондирования. В состав установки входят: два лазера с близким значением длин волн  $\lambda_1=3.3922$  мкм и  $\lambda_2=3.3912$  мкм., модулятор, приемный тракт с телескопом и устройство управления.

Разработана структурная схема электроники приемного тракта лабораторного демонстратора, в состав которой входят: фоторезисторы, блок электроники и компаратор.

Программными средствами САД разработана модель блока приемного тракта. Выполнено моделирование и отработка модуля усиления и фильтрации входного сигнала.

Выполнен аналитический обзор и выбор датчика для приемного тракта. Разработаны модели датчика и модель приемного тракта регистрирующей аппаратуры. Выполнена отработка моделей. Модель генерирует электрический сигнал, имитируя зондирование приземного слоя. При моделировании осуществляется сложение электрических сигналов приемного и опорного фоторезисторов, полученных на выходе схем усиления. В зависимости от заданного порога переключения, посредством компаратора генерируется сигнал «метан». Результатом работы схемы является сигнал, формируемый при превышении заданного порога обнаружения, что при реальном зондировании означало бы наличие метана с заданной концентрацией.

Полученные в процессе моделирования диаграммы напряжений выходов каждого из операционных усилителей, входящих в состав приемника показывают требуемую чувствительность модели.

Анализ диаграмм показал, что при изготовлении лабораторного демонстратора достаточно одного каскада усиления для получения сигнала.

Однако при натурных испытаниях требуется создание помеховой обстановки максимально полно имитирующей штатную эксплуатацию.

Отмечено, что разработанная модель является идеализированной поэтому, при переходе к изготовлению прототипов необходимо учитывать ряд дополнительных параметров. В том числе помехи аналогового тракта, помехи питания и разброс параметров элементов схем.

Таким образом, решена задача разработки принципа функционирования лидара и проектирования модели приемного тракта аппаратуры. Это позволяет перейти к разработке и изготовлению основных элементов приемного тракта в виде лабораторного демонстратора.



## 4 Разработка тестового лабораторного демонстратора

### 4.1 Сбор и тестирование макетов приемной аппаратуры

Изначально на плату был помещен один каскад, включающий фоторезистор и схему на основе инвертирующего операционного усилителя К140УД608, коэффициент усиления было решено регулировать при помощи подстроечного резистора, установленного в цепь обратной связи. При реализации лабораторного образца, фоторезистор и постоянный резистор образуют резистивный делитель. Однако принято решение о регулировке тока в делителе. Для этого постоянный резистор был замен на подстроечный. На плату подаётся +15В, -15В для питания операционных усилителей, питание фоторезистора +5В.

Одной из первых проблем, с которой пришлось столкнуться при сборке реальной модели приемника, оказалась низкочастотная помеха по сети питания демонстратора 220В (рисунок 4.1).

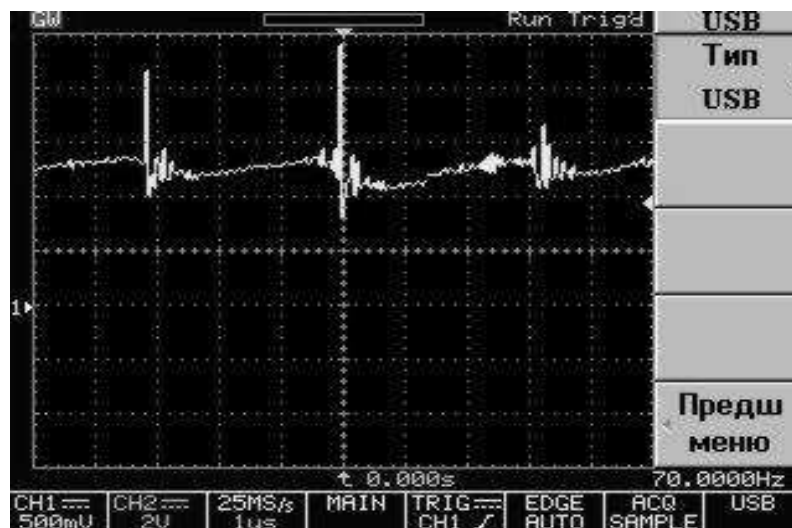


Рисунок 4.1 – Осциллограмма выходного напряжения усилителя при помехах на линий питания +/-15В. (Статический режим работы)

Для исключения помех были применены фильтры на основе конденсаторов по линиям питания +15 и -15. В будущем следует учесть, что

при летных испытаниях питание лидара осуществляется от бортовой сети, при этом для обеспечения высокой чувствительности датчика следует применять, специальные источники высокостабильного питающего напряжения.

На рисунке 4.2 отображена работа схемы после установки фильтров. Помехи сохранились, но при этом свелись к минимуму, позволяя анализировать результаты.

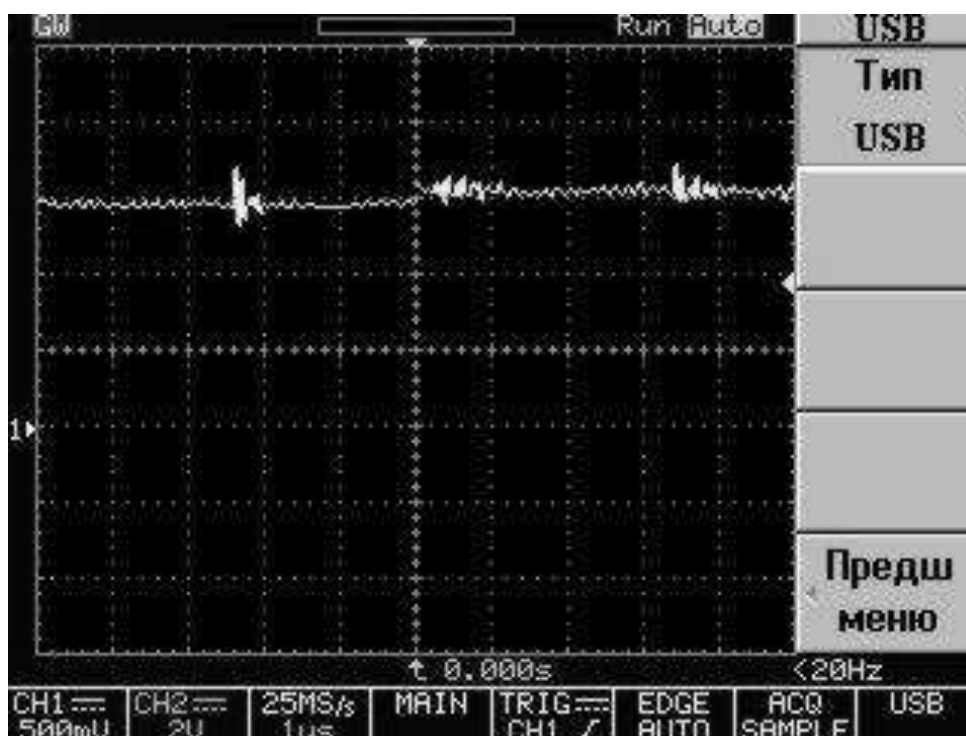


Рисунок 4.2 – Результат работы схемы после установки фильтров

Следующим этапом было добавление еще одного фоторезистора с каскадом усиления. Фото разработанного лабораторного макета с двумя каскадами усиления приведено на рисунке 4.3.

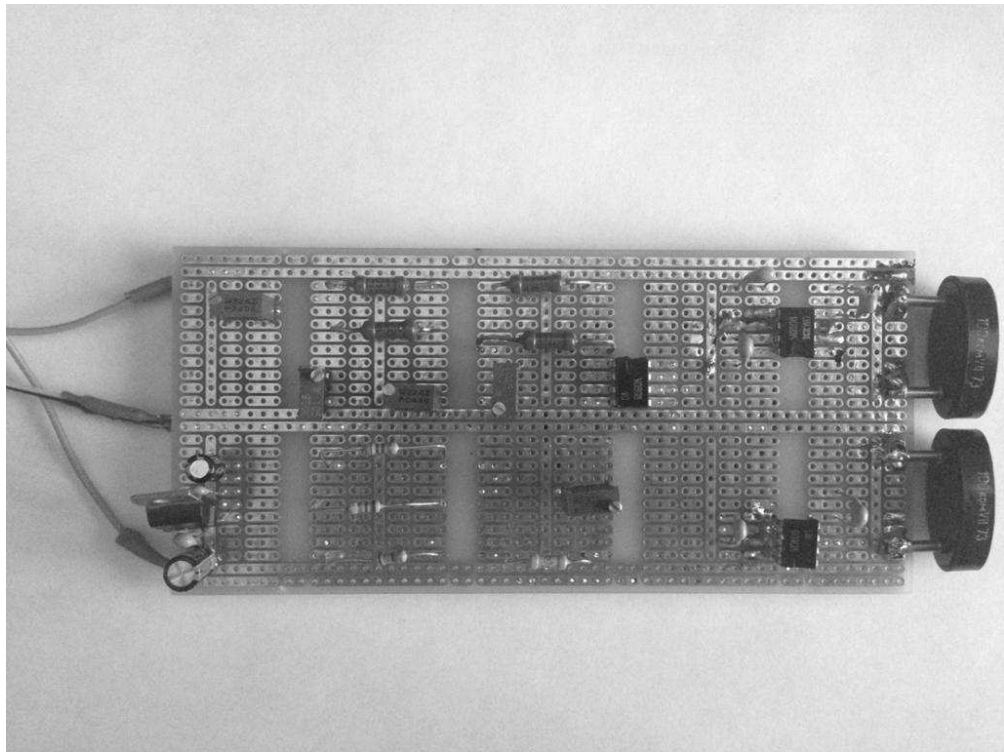


Рисунок 4.3 – Конечный вариант схемы. Используется три операционных усилителя, два приемника и аналоговый сумматор

После получения промежуточных результатов, позволяющих определить, что каскад работает верно: фоторезистор реагирует на изменение светового потока, направленного на его фоточувствительные элементы (рисунок 4.2), происходит усиление и фильтрация сигнала.

На рисунке 4.4 изображена временная диаграмма, снятая с выходов усилительного тракта лазерных приемников:

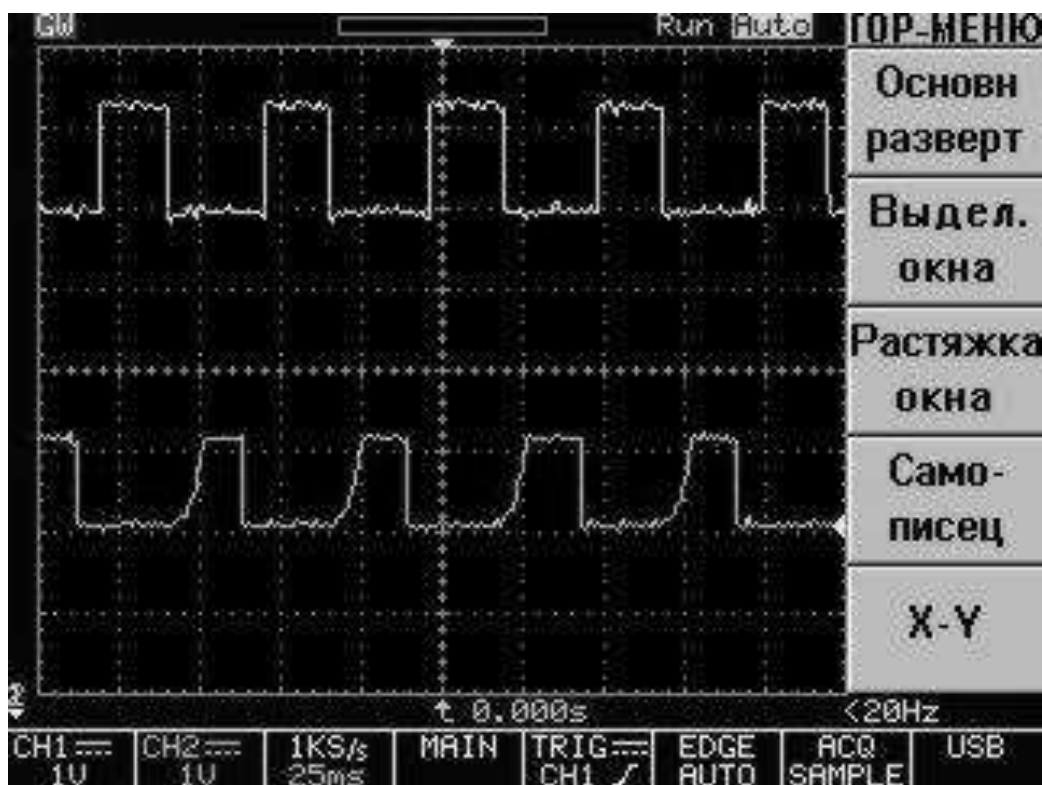


Рисунок 4.4 – Сигнал в противофазе на выходах операционных усилителей при одновременной подачи на фоторезисторы переменной засветки с частотой 20-40 Герц

После установки сумматора были проведены тесты, результаты которых приведены на рис. 4.5 и 4.6. Изначально подавали световые импульсы только на один фоторезистор, при этом засветка второго была отключена. Тем самым имитировали полное поглощение светового потока метаном. Получили на выходе сумматора 2 деления по амплитуде, то есть 0.4 В (рисунок 4.5). В следующем этапе подавали непрерывную засветку на второй фоторезистор, на выходе сумматора амплитуда увеличивается на 0.2 В. То есть имитировали отсутствие метана. Полученные диаграммы позволили убедиться в корректной работе модуля сумматора.

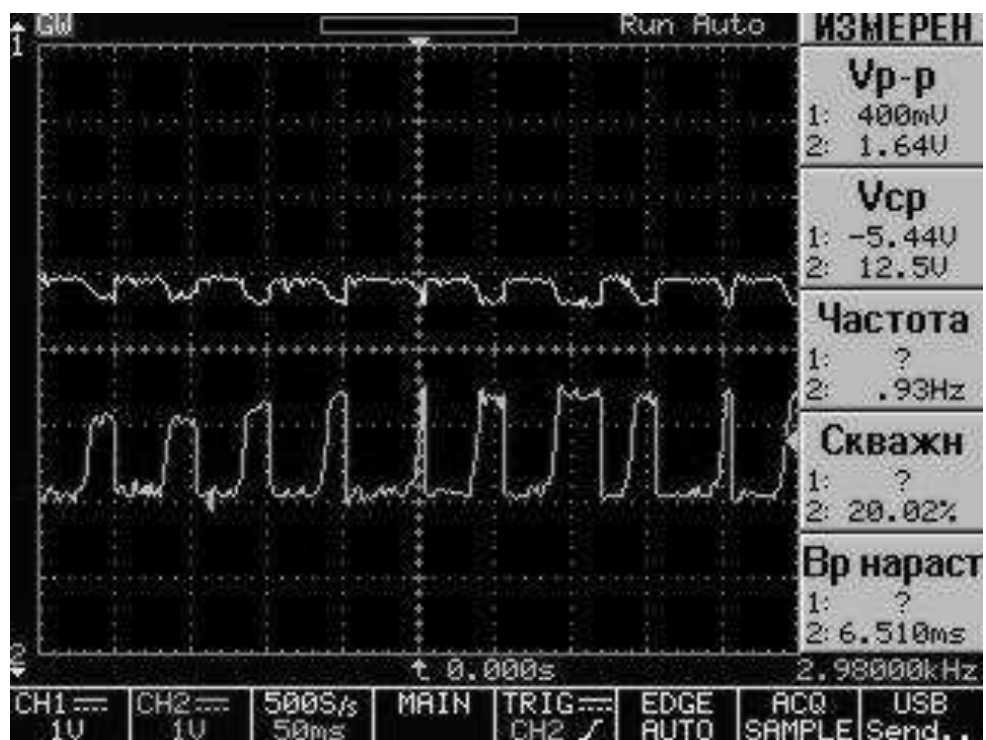


Рисунок 4.5 – Верхний график отображает сигнал на выходе сумматора. Нижний график отображает сигнал на выходе усилителя первого канала

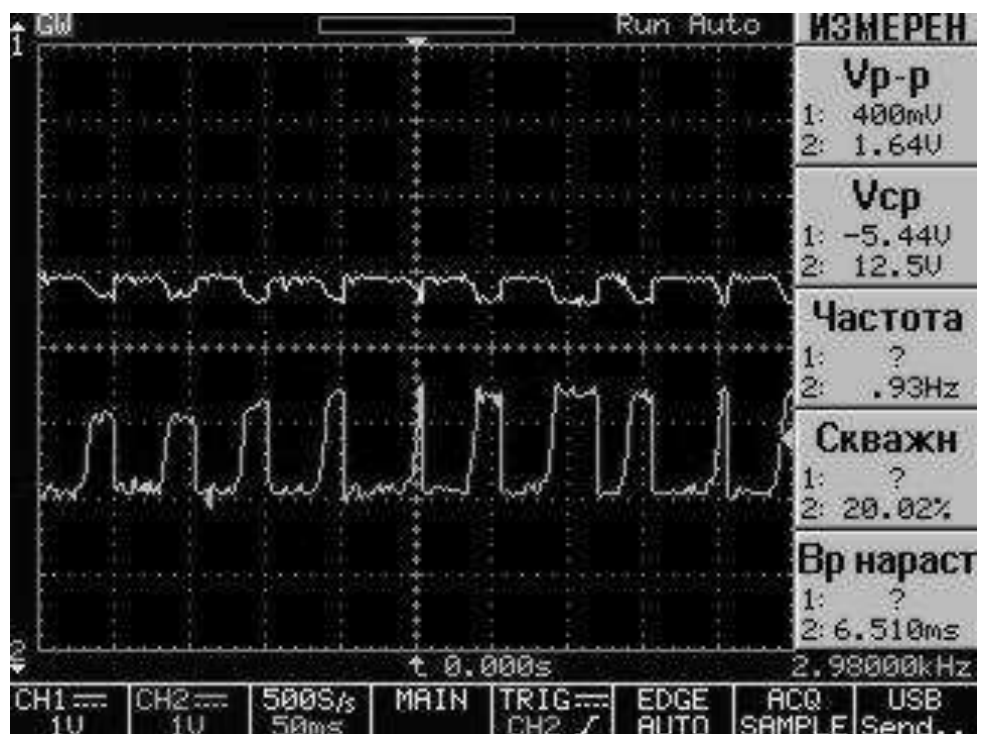


Рисунок 4.6 – Верхний график отображает сигнал на выходе сумматора после подачи непрерывного света на второй фоторезистор. Нижний график отображает сигнал на выходе усилителя первого канала

## 4.2 Выводы по главе

- 1) Разработан лабораторный макет, предназначенный для определения уровня мощности светового потока;
- 2) Выполнена отладка и тестирование макета;
- 3) Имитирована помеха бортовой сети питания, применены фильтры по питанию на основе конденсаторов для удаления низкочастотных помех;
- 4) Макет доработан, задействован модуль аналогового сумматора на основе операционного усилителя. Получены результаты лабораторных испытаний макета;
- 5) Амплитуда выходного сигнала на сумматоре составила 0.6-0.8 В, что при шкале питания 30 В составляет порядка 2,6 % от максимума полезного сигнала;
- 6) Примененные при макетировании датчики (фоторезисторы) имеют наибольшую чувствительность в ИК диапазоне, следовательно, могут с успехом применяться для построения лабораторного демонстратора лидарной установки, так как применяемые для избирательного воздействия на метан лазеры излучают в ИК диапазоне.

За счет используемых фоторезисторов с высокой селективностью на заданных длинах волн, а так же использования специального математического и программного обеспечения для фильтрации полезного сигнала появляется возможность добиться необходимого порога чувствительности в единицы ppm, что позволит осуществлять поиск предельно низких концентраций метана в атмосфере.

Результаты натурного моделирования позволили подтвердить предварительные расчеты коэффициентов лидарного уравнения.

Таким образом, была решена задача по разработке и тестированию функциональных узлов лидара.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения проекта были решены следующие задачи:

1) Проведено исследование существующих методов дистанционного зондирования атмосферы, которое позволило предложить метод дистанционного лидарного зондирования атмосферы, основанный на принципе резонансного поглощения лазерного излучения метаном на селективной частоте;

2) Выполнено патентное исследование и проведен анализ существующих решений для определения концентраций метана, по результатам которого определено что известные решения не отвечают текущим требованиям по оперативности и точности определения, при этом прямых аналогов разрабатываемого лидара не выявлено;

3) Модернизирована математическая модель трассы прохождения светового пучка лидара в атмосфере. Разработана программная модель лидара и выполнена ее отработка в пакете прикладных программ Matlab. Выполнен анализ полученных результатов, который, показал, что с учетом введенных коэффициентов, имеется возможность достигнуть чувствительности прибора в единицы ppm;

4) Разработана функциональная схема лидара, алгоритмическое и программное обеспечение устройства управления лазерной установкой. Получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

5) Разработаны модели блока обработки входного сигнала лазера и приемно-усилительного тракта. В программной среде MicroCap выполнено моделирование, по результатам которого сформирован перечень требований для практической реализации лабораторного макета. При моделировании достигнута расчетная чувствительность прибора в 1 ppm;

6) Выполнен аналитический обзор и сравнительный анализ существующих фотоприемных датчиков. Сделано обоснование выбора

датчика для приемного тракта. Разработана модель датчика и выполнено моделирование приемника;

7) Разработан и изготовлен прототип технического решения для усилительного тракта приемной аппаратуры авиационного лидара, позволяющего выявлять поверхностные утечки газа для последующей локализации природных месторождений с топографической привязкой к местности.

8) Разработано ПО приема-передачи устройства управления лазерной установкой. Изготовлен лабораторный демонстратор, на базе которого были проведены предварительные испытания.

Полученные результаты лабораторной отработки и результаты анализа данных моделирования показали, что разработанная модель и приемная аппаратура адекватно обрабатывает сигнал и выдает корректные результаты, что соответствует теоретическим предпосылкам создания лидара упомянутых в 1 главе.

Таким образом, все поставленные в рамках ВРК задачи успешно решены, цель магистерской диссертации достигнута. Полученный научно-технический задел предназначен для создания комплекса лидарного авиационного зондирования атмосферы, позволяющего определять предельно-малые концентрации метана (до единиц ppm) в воздухе и приземном слое на трассах зондирования от 50 до 150 м.

Полученные технические решения позволяют создать лидар снаряженной массой до 2 кг. И потреблением от бортовой сети не более 1 А/час, что позволяет разместить лидарную установку на базе промышленного БПЛА и использовать полученные решения в георазведке для поиска и локализации выходов природного газа на поверхность с топографической привязкой. В области предупреждения ЧС и экологических катастроф группировки БПЛА и/или стационарных постов позволят определять предельно малые концентрации метано-содержащих веществ,



заблаговременно позволяя выполнить комплекс работ по предупреждению ЧС.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП	–	Аналого-цифровой преобразователь
ДТ	–	Датчик температуры
ИВП	–	Источник высоковольтного питания
ИК	–	Инфракрасный
ИФП	–	Измерительный канал фотоприемника
КПД	–	Коэффициент полезного действия
м.х.к.	–	Многоходовая кювета
МСМ	–	Модулятор-стабилизатор мощности
ОУ	–	Операционный усилитель
ОФП	–	Опорный канал фотоприемника
ПГС	–	Параметрический генератор света
ПЗУ	–	Постоянное запоминающее устройство
ПО	–	Программное обеспечение
ПУ	–	Преобразователь уровней
РИОН	–	Регулирующий опорный источник ЦАП
СП	–	Сигнальный процессор
ТЭО	–	Термоэлектрический микроохладитель
УОС		Удельная обнаружительная способность
УСМ	–	Усилитель сигнала модуляции
ФГП	–	Фотогальванический приемник
ФГФ	–	Функция геометрического фактора
ФПУ	–	Фотоприемное устройство
ФР	–	Фоторезистор
ФЭМ	–	Фотоэлектрический модуль
ФЭП	–	Фоточувствительный элемент приемника
ЦАП	–	Цифро-аналоговый преобразователь
ЭНЗУ	–	Энергонезависимая память

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агишев, Р.Р. Лидарный мониторинг атмосферы : монография / Р.Р. Агишев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 313 с.
2. Mirosław Kopica, Jong Woon Choi / Simple laser system for methane detection // Proc. SPIE 5234, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII, (2 February 2004).
3. Бубличенко, И. А. Лазерный газоанализатор «ЛГАУ-02». Приборы и техника эксперимента / И.А. Бубличенко, Б.Е. Мохноножкин // Приборы и техника эксперимента – 1999. - №5. – С. 126-129.
4. Бубличенко, И. А. Оптика и спектроскопия / И. А. Бубличенко // Приборы и техника эксперимента. - 1990. - № 5. – С. 11-26.
5. Бубличенко И. А. Приборы и системы управления / И. А. Бубличенко // Приборы и техника эксперимента - 1998. - № 9. – С. 8-15.
6. Зуев, В.Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы : учеб. пособие / В.Е. Зуев, В.В. Зуев. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. – 232 с.
7. Зуев, В.Е. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей : учеб. пособие / В.Е. Зуев. - Новосибирск : Издательство “Наука” Сибирское отделение, 1986. – 189 с.
8. Зуев, В.Е. Лазерный контроль атмосферы : перевод с английского / В.Е. Зуев, Э.Д. Хинкли. – Москва : Мир, 1979. – 416 с.
9. Зуев, В.Е. Оптическая погода : монография / В.Е. Зуев, Б.Д. Белан, Г.О. Задде. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1990. – 191 с.
10. Зуев, В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех : монография / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – Москва : Советское радио, 1977. – 368 с.

11. Воронина, Э.И. Лидарная система управления качеством воздуха над промышленным районом / Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин // Экологические системы и приборы. – 2002. – №4. – С. 13-15.
12. Привалов, В.Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : справоч./ В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин. – Санкт-Петербург : Изд-во БГТУ, 2001.
13. Батраков, А.С. Лазерные измерительные системы / А.С. Батраков. – Москва : Радио и связь, 1981. – 456 с.
14. Алексеенко, А.Г. Основы микросхемотехники. Элементы морфологии микроэлектронной аппаратуры : учебное пособие / А.Г. Алексеенко. – Москва : Сов. Радио, 1977. - 408 с.
15. Инфракрасные спектры излучения земли в космос : науч. изд. / Ю.Г. Андрианов, И.И. Караваев, Ю.П. Сафронов, В.И. Тулупов. – Москва : Сов.радио, 1973. – 98 с.
16. Ануфриев, И.Е. Matlab 7 : учеб. пособие/ И.Е. Ануфриев, А.Е. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
17. Аршинов, Ю.Ф. Калибровка КР – лидарного газоанализатора выбросов в атмосферу из труб предприятий с помощью удалённой газовой кюветы / Ю.Ф. Аршинов // Оптика атмосферы и океана. - 1997. - № 3. – С. 353 – 359.
18. Ахманов, С.А. Физическая оптика : учебник / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – Москва : Издательство МГУ, 1998. – 656 с.
19. Бараночников, М.Л. Справочник. Приемники оптического излучения : справочник / М.Л. Бараночников. – Москва : Радио и связь, 1987. – 167 с.
20. Гашников, М.В. Методы компьютерной обработки изображений : учебное пособие / М.В. Гашников, Н.И. Глумов. – Москва : Физматлит, 2001. – 781 с.

21. Карасик, В.Е. Лазерные системы видения : учебное пособие / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
22. Киенко, Ю.П. Введение в космическое природоведение и картографирование : учеб. пособие / Ю.П. Кенко. – Москва : Картгеоцентр-Геозедиздат, 1994. – 211 с.
23. Климков, Ю.М. Основы расчёта оптико-электронных приборов с лазерами : научное издание / Ю.М. Климков. – Москва : Советское радио, 1978. – 262 с.
24. GAPHYOR Update 1990. 1990.V. 13. N 1.
25. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database / Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer (JQSRT). – 2017. - №203. – 3-69 pp.
26. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. 2009. JQSRT, 110, 533-572.
27. Ward S. The Earth observation handbook 2012: special edition for Rio+20, [ESA SP-1325, July 2012]. ESA Communications, Ed. Wilson A., 2012, pp. 212.
28. Voitsekhovskaya O.K., Makushkin Yu.S., Popkov A.I. et al. II Computer Enhanced Spectroscopy. 1984. V. 2. P. 101.
29. Копилевич, Ю.И. О количественной интерпретации импульсных сигналов авиационного океанографического лидара / Ю.И. Копилевич // Научно-технический вестник. – 2005. - №20. – С. 35.
30. Попов, А. И. Журнал прикладной спектроскопии / Попов А. И., Садчихин А. В. – 1991. - 426 с.
31. Гарбук, С.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли: науч. изд. / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. – Москва : А и Б, 1997. – 296 с.

32. Kampker, A.; Sefati, M.; Rachman, A.A.; Kreisköther, K.; Campoy, P. Towards Multi-Object Detection and Tracking in Urban Scenario under Uncertainties. In Proceedings of the 2018 International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VENITS), Madeira, Portugal, 16-18 March 2018; pp. 156–167.

33. Лещенко С.Л. Математическая модель трассы лидара / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий // МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ - ММТТ. Изд. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – Саратов, 2018. – 21-24 с.

34. Лещенко С.Л. Математический аппарат трассы лидара для определения предельно малых концентраций углеводорода / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий // Робототехника и искусственный интеллект: материалы X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2018. – 60-66 с.

35. Ивлев Л.С., Довгальюк Ю.А. // Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194с.

36. Попов Д.В. Модель приемного тракта лидара для поиска предельно малых концентраций углеводородов // European Scientific Conference: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. В 3 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2018.104-108 с.

37. Лещенко С.Л. Способы компенсации помех при дистанционном лидарном зондировании земной поверхности на наличие малых концентраций метана / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий // сборник материалов VI Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», – Красноярск, 2019. – 53-55 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Листинг кода программы Matlab

```
Fs = 1e8;
t = 0:1/Fs:(10*300e-6);    %начало отсчета: шаг : конец отсчета (количество
%ИМПУЛЬСОВ)
pulsewidth = 147e-6;      %длина импульса
pulseperiods = 294e-6;    %период
P1 = 2; %МОЩНОСТЬ
P2 = 1; %МОЩНОСТЬ
x1 = P1/2+P1/2*sqrt(2*pi*1/pulseperiods*t, pulsewidth/pulseperiods*100);
x2 = P2/2-P2/2*sqrt(2*pi*1/pulseperiods*t, pulsewidth/pulseperiods*100);
subplot(211)
plot(t.*1e6, x1); axis([0 600 -4 4]);
xlabel('\mus'); ylabel('Amplitude, *10^-5');
subplot(212)
plot(t.*1e6, x2); axis([0 600 -4 4]);
xlabel('\mus'); ylabel('Amplitude, *10^-5');

P01 = 20;
P02 = 10;
n = 0.8;
c = 3e8;
ta = 294e-6;
E = 1;
A0 = 0.0181;
Ar = A0 * E;
Bet = 6.83*10^-3;
R = 50;
```

Cons1 = P01 \* n \* c \* ta / 2 \* Ar

Cons2 = P02 \* n \* c \* ta / 2 \* Ar

Alph = -0.1;

e1 = exp(-2\*50\*Alph);

e2 = 1;

P12 = Cons1 / R^2 \* Bet \* e1

P22 = Cons2 / R^2 \* Bet \* e2

P3 = P12+P22

Fs = 1e8;

t = 0:1/Fs:(10\*300e-6);

pulsewidth = 147e-6;

pulseperiods = 294e-6;

x1 = P12/2+P12/2\* $\sin(2*\pi*1/\text{pulseperiods}*t, \text{pulsewidth}/\text{pulseperiods}*100)$ ;

x2 = P22/2-P22/2\* $\sin(2*\pi*1/\text{pulseperiods}*t, \text{pulsewidth}/\text{pulseperiods}*100)$ ;

x3 = x1 + x2;

subplot(311)

plot(t.\*1e6, x1); axis([0 600 -0.04 0.04]);

xlabel('\mus'); ylabel('Amplitude, \*10^-5');

subplot(312)

plot(t.\*1e6, x2); axis([0 600 -0.04 0.04]);

xlabel('\mus'); ylabel('Amplitude, \*10^-5');

subplot(313)

plot(t.\*1e6, x3); axis([0 600 -0.01 0.05]);

xlabel('\mus'); ylabel('Amplitude, \*10^-5');

a = -5:0.00001:50;

y = exp(a);

plot(a, y);



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Перечень элементов блока усиления

Таблица 1 - Перечень элементов

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
DA1-DA4	К140УД6	4	Операционный усилитель
R1, R5	МЛТ-0,125-240кОм	2	Резистор
R2, R6, R9, R10, R11	МЛТ-0,125-100кОм	5	Резистор
R3, R7	МЛТ-0,125-150кОм	2	Резистор
R4, R8	МЛТ-0,125-510кОм	2	Резистор
R12	МЛТ-0,125-200кОм	1	Резистор
R13	СПЗ-16а-10кОм	1	Резистор
R14, R15	ФСА-1 – 40кОм-40МОм	2	Фоторезистор

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Чертеж схемы аппаратуры

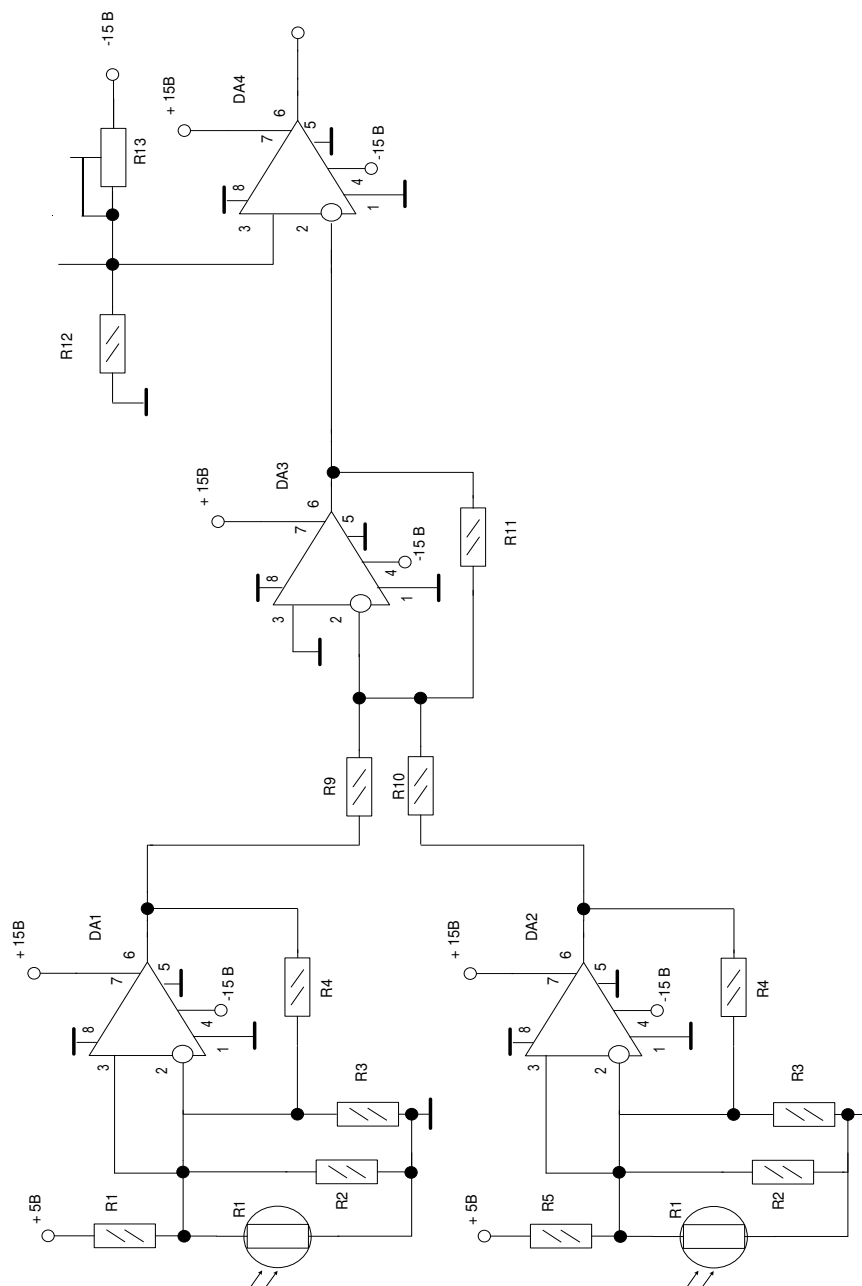


Рисунок 1 – Схема на операционных усилителях

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Перечень публикаций по теме диссертации

1. Моделирование трассы лидара при проведении замеров предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое / С.Л. Лещенко, О.В. Непомнящий, Д.В. Попов / Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы V Междунар. науч. конф., Красноярск, 11–14 сентября 2018 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – 149-153 с.

2. Lidar beam path model for measuring extremely low concentrations of hydrocarbons in the surface layer. Nepomnyashchiy O., Sirotinina N., Popov D., Leshenko S. Anthology of scientific research papers “Space Engineering, Technologies & Exploration”. ECM Space Technologies GmbH, Berlin, Germany, 2018. p.p.186-190.

3. Математическая модель трассы лидара для измерения чрезвычайно низких концентраций углеводородов в поверхностном слое / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий/Сборник статей XVII международной научно-практической телеконференции / Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность РФ», 2018. — 82-84с.

4. Математическая модель трассы лидара / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий / Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний: Методы и средства — Новосибирск, 2018. — 203-209 с.

5. Математическая модель трассы лидара / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий / МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ - ММТТ. Изд. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. — Саратов, 2018. — 21-24 с.

6. Математический аппарат трассы лидара для определения предельно малых концентраций углеводорода / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов, Д.О. Непомнящий / Робототехника и искусственный интеллект: материалы X

Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 8 декабря 2018 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. (7,2 Мб). – Красноярск: ЛИТЕРА-принт, 2018. – 60-66 с.

7. Метод дистанционного авиационного зондирования атмосферы для поиска залежей углеводородного сырья / С.Л. Лещенко, Д.В. Попов / V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сборник научных трудов. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ — Москва, 2019. – 342-344 с.

8. Lidar for searching extremely low concentrations of hydrocarbon raw materials/ С.Л. Лещенко, Д.О. Непомнящий, Д.В.Попов, / Проспект Свободный-2019 (22-26 апреля 2019 г.)

9. Лидар для поиска предельно малых концентраций углеводородного сырья / С.Л. Лещенко, Д.О. Непомнящий, Д.В. Попов / Молодые ученые в решении актуальных проблем науки [Электронный ресурс] : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (25 апреля 2018 г., Красноярск).

10. Способы компенсации помех при дистанционном лидарном зондировании земной поверхности на наличие малых концентраций метана / С.Л. Лещенко, Д.О. Непомнящий, Д.В. Попов / Материалы IV Международной конференции Региональные проблемы дистанционного зондирования земли (10-13 сентября 2019 г.), 53-55 стр.

11. Methods of interference compensation for remote lidar sensing of the earth in the methane concentration / С.Л. Лещенко, О.В. Непомнящий / Материалы XXIII Международной научно-практической конференции посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, Ч.2 (11-15 ноября 2019, г.Красноярск), 355-356 стр.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Свидетельство о государственной регистрации ПО для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2019614255**

**Архитектурно-независимая программа управления  
комплексом лидарного зондирования**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования «Сибирский  
федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Непомнящий Олег Владимирович (RU), Лещенко Светлана  
Леонидовна (RU), Попов Дмитрий Викторович (RU),  
Непомнящий Дмитрий Олегович (RU)*

Заявка № **2019612762**  
Дата поступления **19 марта 2019 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **01 апреля 2019 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Нелица* Г.П. Нелица

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Космических и информационных технологий  
институт  
Вычислительная техника  
Кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
О.В. Непомнящий  
подпись      инициалы, фамилия  
«    »      2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Комплекс дистанционного лидарного зондирования для определения  
предельно низких концентраций метана»

тема

09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»

код и наименование направления

09.04.01.06 «Микропроцессорные системы»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

  
22.06.20  
подпись, дата

зав.каф.ВТ, профессор,  
канд.тех.наук, доцент  
должность, ученая степень


Непомнящий О.В.  
инициалы, фамилия

Выпускник

  
22.06.20  
подпись, дата

Лещенко С.Л.  
инициалы, фамилия

Рецензент

  
22.06.2020  
подпись, дата

Гл. спец. отд. РИНТ  
ООО «РН-  
КрасноярскНИПИнефть»  
должность, ученая степень

Ледяев А.И.  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
22.06.20  
подпись, дата

зав.каф.ВТ, профессор,  
канд.тех.наук, доцент  
должность, ученая степень

Непомнящий О.В.  
инициалы, фамилия

Красноярск 2020