

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. В.Е. ЗУЕВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

На правах рукописи

КРЮЧКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЛИДАРНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ
ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ С БЕЗОПАСНОЙ ДЛЯ
ГЛАЗ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
кандидат физико-математических наук
Садовников Сергей Александрович

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ	13
1.1 Атмосфера Земли. Тропосфера.....	13
1.1.1 Приземный атмосферный слой	13
1.2 Типы облаков, их классификация и влияние на климат	14
1.2.1 Фазовый состав облаков	14
1.2.2 Формы облаков	14
1.2.3 Высота облаков	16
1.2.4 Состояние неба.....	17
1.2.5 Облака и радиационный бюджет Земли.....	17
1.3 Аэрозоли.....	18
1.4 Лидарное зондирование атмосферы.....	19
1.4.1 Конфигурации лидарных систем	19
1.4.2 Лидар упругого обратного рассеяния.....	20
1.4.3 Деполяризационный лидар	21
1.5 Лидарные методы определения высоты нижней границы облачности.....	22
1.5.1 Метод обнаружения максимума сигнала	24
1.5.2 Метод поиска перехода через нуль первой производной	24
1.5.3 Метод определения зон.....	26
1.5.4 Метод определения видимости	27
1.6 Системы контроля высоты нижней границы облачности	29
1.6.1 Облакомеры CL31, CL51, CL61	30
1.6.2 Датчик облаков лазерный ДОЛ-2	30
1.6.3 Облакомер CHM 15k „NIMBUS“	31
1.6.4 Лидар SkyVUE 8	32
1.6.5 Прибор R-Map 510	32
1.6.6 Датчики высоты облаков ДВО-2, ДВО-3Л	33
1.6.7 Облакомер CBME80	35

1.7 Выводы	36
2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ	38
2.1 Оптические схемы построения лидаров	38
2.1.1 Базисная схема	39
2.1.2 Биаксиальная моностатическая схема	39
2.1.3 Коаксиальная схема	40
2.1.4 Коаксиальная схема с полупрозрачным зеркалом	41
2.2 Математическая модель для расчёта оптической схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности	42
2.2.1 Геометрический форм-фактор биаксиальной схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности	43
2.3 Выбор элементной базы прибора контроля высоты нижней границы облачности	47
2.3.1 Излучатель	47
2.3.2 Детектор	51
2.4 Конструкция разработанного прибора	58
2.5 Юстировка прибора контроля высоты нижней границы облачности	59
2.6 Калибровка прибора контроля высоты нижней границы облачности	63
2.7 Выводы	67
3 УСТРОЙСТВО СНИЖЕНИЯ ФОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЛИДАРНЫХ СИГНАЛАХ	68
3.1 Фоновое излучение	68
3.2 Использование полупроводниковых лазерных диодов в оптоэлектронных приборах	70
3.3 Способ уменьшения фона в сигнале прибора контроля высоты нижней границы облачности	73
3.3.1 Аппаратная часть	76
3.3.2 Программная часть	77
3.4 Выводы	79

4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЫСОТЕ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ.....	80
4.1 Описание программы микропроцессора	80
4.1.1 Алгоритм программы	81
4.1.2 Используемые методы обработки данных	86
4.2 Описание программы передачи параметров и записи данных.....	86
4.2.1 Описание алгоритма и функционирования программы	87
4.3 Описание программы визуализации результатов расчетов высоты нижней границы облачности.....	89
4.3.1 Алгоритм, используемые методы и структура программы.....	89
4.4 Результаты работы программного комплекса.....	101
4.5 Выводы	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ И ПАТЕНТЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Высота нижней границы облачности является одним из факторов, влияющих на безопасности взлета и посадки воздушных судов, так как она определяет ту высоту, на которой пилот сможет осуществить визуальный контакт с землёй. Значения высоты нижней границы облачности входят в эксплуатационный минимум. Эксплуатационный минимум в авиации – минимальные значения высоты нижней границы облаков и горизонтальной видимости, при которых возможно выполнение взлётов, посадок и полётов по маршруту [1].

Высота расположения нижней границы облаков имеет большое практическое значение. Так, высоты менее 600 м, волнистая и изорванная граница облаков, затрудняют взлёт и особенно посадку самолётов и вертолётв. С низкой облачностью связано ухудшение видимости. В силу исключительной важности высоты нижней границы облаков нижнего яруса эта метеорологическая величина всегда привлекала к себе внимание исследователей и практиков. В настоящее время имеется целый ряд данных о нижней границе облаков нижнего яруса, причём в довольно большом диапазоне значений. Дело в том, что высота расположения низких облаков достаточно сильно зависит от притока тепла к подстилающей поверхности, поэтому эта величина проявляет отчётливую широтную, годовую и даже суточную изменчивость [2].

Полученные с помощью приборов значения высоты нижней границы облаков (высоты нижней границы облачности) позволяют судить о высоте обнаружения пилотом наземных ориентиров и возможности выполнения полетов при данных метеорологических минимумах.

В настоящее время в мировой практике ведется разработка и внедрение нового поколения приборов контроля высоты облаков, базирующихся на современной микроэлектронной технике, обработке больших массивов данных с помощью встроенных микропроцессоров, использовании сложных алгоритмов выделения и интерпретации эхо-сигналов от облачной атмосферы, использовании новых средств зондирования, в частности, полупроводниковых лазеров, а также

твердотельных лазеров с использованием в качестве элемента накачки энергии полупроводниковых лазерных диодов.

Автоматическое получение информации о высоте облаков, сопоставимой с оценками пилота воздушного судна, совершающего посадку, является сложной задачей, не имеющей в полной мере удовлетворительного решения. Основными причинами этого являются сложная структура подоблачного слоя, большая временная и пространственная изменчивость высоты нижней границы облаков. Это крайне усложняет процедуру интерпретации эхо-сигнала, его связи с высотой визуального контакта пилота с наземными ориентирами [3].

Само понятие нижняя граница облаков в различных источниках трактуется по-разному.

Нижняя граница облаков – уровень (поверхность) в атмосфере, на котором водность облака, если перемещаться внутри него по вертикали вниз, обращается в нуль [4].

Например, в работе Шаманаева В. С. выделяется 6 характерных точек в лидарном сигнале, которые можно принять за высоту нижней границы облачности при определенных критериях [5].

Существуют и другие определения высоты нижней границы облачности. Нижняя граница облаков определяется как самая нижняя зона, в которой прозрачность от значений, соответствующих ясному небу или дымке, переходит к значениям, соответствующим совокупности водяных капель и кристаллов льда.

Высота нижней границы облаков (высоты нижней границы облачности) – расстояние по вертикали между поверхностью суши (воды) и нижней границей самого низкого слоя облаков. Разорванный и неустойчивый характер основания многих видов облаков не позволяет однозначно определить высоту нижней границы облаков. Невозможность четкого и однозначного определения нижней границы облаков создает трудности в контроле ее высоты. При диагностике высоты нижней границы облаков облакомерами (прожекторы, светолокаторы, лазеры) фактически определяется расстояние от излучателя до светового пятна, возникающего в основании облака от светового потока, посланного этим

излучателем, яркость которого соответствует чувствительности приемного устройства облакомера. При тумане, снеге и других атмосферных явлениях расстояние от передатчика светового потока до светового пятна принимается за вертикальную видимость [6].

В связи с этим важной задачей является анализ, обоснование и разработка требований к приборам контроля высоты облаков с учетом принятой к использованию технологии метеорологического обеспечения взлета/посадки воздушных судов [3].

Также создание приборов контроля высоты облаков нового поколения требует не только разработки технических средств, но и проведения ряда экспериментальных исследований, связанных с разработкой алгоритмов работы прибора и его испытаниями в реальных метеорологических условиях.

Объектом исследования в работе являются аэрозольные образования в нижней тропосфере и взаимодействие с ними оптического излучения.

Предмет исследования: методы дистанционного контроля высоты нижней границы облачности, принципы работы приборов, реализующих эти методы.

Целью диссертации является разработка аппаратно-программного комплекса контроля высоты нижней границы облачности в диапазоне от 15 м до 2000 м в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн с безопасным для глаз уровнем излучения.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ ограничений, присущих существующим системам контроля высоты нижней границы облачности;
2. Разработать схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности исходя из условий минимальных габаритов и исключения использования общих оптических поверхностей излучателя и приёмного тракта при регистрации высоты нижней границы облачности в диапазоне от 15 м до 2000 м;
3. Разработать модель лидара для обоснования размеров элементов оптической схемы и выбора оптимальной базы между приёмопередающими каналами.

4. Разработать макет прибора контроля высоты нижней границы облачности;
5. Разработать методику юстировки макета прибора контроля высоты нижней границы облачности;
6. Разработать программу микропроцессора, которая занимается сбором, накоплением и первичной обработкой эхосигналов, по данным, полученным из аппаратных измерений с платы АЦП прибора контроля высоты нижней границы облачности;
7. Разработать программу обмена между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером, для передачи и быстрого сохранения полученных данных от прибора контроля высоты нижней границы облачности на ПК с целью дальнейшей обработки и расчета высоты нижней границы облачности;
8. Разработать программу определения высоты нижней границы облачности для обработки получаемых от прибора контроля высоты нижней границы облачности данных и выдачи обработанных результатов в текстовом и графическом виде;
9. Провести испытания разработанного макета прибора контроля высоты нижней границы облачности в условиях реальной атмосферы.

Научная новизна

1. Разработан лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с безопасным для глаз уровнем интенсивности инфракрасного лазерного диода с габаритными размерами 590×340×168 мм и массой 13,5 кг, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.
2. Экспериментально установлено, что предложенный метод снижения фона в сигнале лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности, в котором на вход усилителя подается с противоположным знаком значение вычисленного ранее фона, обеспечивает

круглосуточное функционирование усилительного тракта без насыщения при использовании широкополосного оптического фильтра.

3. Разработаны способ и устройство для калибровки созданного лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности, содержащее нормализованную катушку оптоволокна и два коллиматора с юстировочными узлами, позволяющие производить калибровку и проверку функционирования лидарного программно-аппаратного комплекса контроля высоты нижней границы облачности в полевых условиях.
4. Показано, что метод определения высоты нижней границы облачности из лидарного сигнала, в котором за высоту нижней границы облачности принимается локальный максимум производной сигнала, позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.
5. Разработан программный комплекс обработки лидарных сигналов, который позволяет получать, непрерывно накапливать и сохранять лидарные данные с частотой дискретизации 20 МГц, а также восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности из полученных данных, с учётом наклона прибора, высоты над уровнем земли.

Научная и практическая значимость работы

В рамках диссертации разработан и реализован в виде действующего макета лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности с габаритными размерами не более 590×340×168 мм и массой изделия не более 13,5 кг, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.

Результаты исследования были использованы при выполнении проектов «Лазерные, оптические и акустические технологии дистанционного изучения атмосферы» № 121031500341, «Развитие фундаментальных основ новых технологий обеспечения безопасности жизнедеятельности на основе интеграции мультимодальной радиоволновой и оптической дистанционной сенсорики, и искусственного интеллекта» № 075-15-2024-557, договора №331И/022-21.

Достоверность научных результатов

Результаты диссертации получены с использованием современного технического оборудования. Мощность излучения регистрировалась поверенным измерителем средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н. Спектры излучения регистрировались спектрометром Andor Shamrock 303 i (с разрешением 0,7 нм), с использованием световода Ocean Optics QP600-2-SR-BX. Изображения, полученные при юстировке, регистрировались видеокамерой HI-IPN200F10SW.

В работе использовались стандартные методы: анализ и синтез схемных решений, математическое моделирование геометрической функции прибора, измерение параметров геометрической функции в макете лидара, сопоставление результатов моделирования и эксперимента. Также о достоверности полученных результатов говорит их многократная воспроизводимость.

По результатам работы были сформулированы следующие **защищаемые положения, выносимые на защиту:**

1. Лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с лазерным диодом импульсной мощностью на уровне 70 Вт, длительностью импульса 35 ± 5 нс, с центральной длиной волны близ 905 нм, позволяет определять высоты нижней границы облачности в диапазоне от 15-100 м с погрешностью ± 10 м и в диапазоне 100-2000 м с погрешностью ± 10 % при отношении сигнал/шум больше 10.

2. Схемное решение АЦП-ЦАП с замкнутой цифровой обратной связью для вычитания фоновой составляющей из сигнала лавинного фотодиода при применении оптического фильтра с полосой пропускания 25 нм, соотношении сигнал/фон более 0.00001, обеспечивает функционирование усилительного тракта облакомера без насыщения при регистрации высоты нижней границы облачности от 15 до 2000 м.

3. Программный комплекс обработки лидарных сигналов позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности в диапазоне от 15 до 2000 м, до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации, составившие основу защищаемых положений, получены автором самостоятельно или при непосредственном участии. Автор принимал участие в изготовлении, разработке экспериментальных стендов для проведения исследований. Кроме того, автором выполнялась подготовка и проведение экспериментов, и обработка полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях и симпозиумах: X Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Россия, Томск, 2012; III Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», Санкт-Петербург, 2014; XXII Рабочая группа Аэрозоли Сибири, Томск, 2015; XXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2016; XXIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2017; XXIV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2018; XXV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Новосибирск, 2019; XXVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, 2020; XXIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, 2023.

Публикации

Результаты диссертационной работы представлены в научной печати в рецензируемых статьях и докладах на научных конференциях.

Список работ состоит из 18 публикаций, из них 3 статьи входят в базы данных Scopus и WoS, 2 статьи опубликовано в научных журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы диссертации представлены на 7 международных и всероссийских конференциях. Оформлено 2 патента на полезную модель и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе изложено современное состояние проблемы контроля высоты нижней границы облачности, систематизированы знания об атмосфере Земли, типах облаков, приведен обзор лидарных систем и методов контроля высоты нижней границы облачности, а также основные сведения о современных системах контроля высоты нижней границы облачности.

Во второй главе приведен анализ и выбор оптической схемы приборов контроля высоты нижней границы облачности, показана математическая модель для геометрического расчёта биаксиальной оптической схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности, описан выбор элементной базы, конструкция разработанного прибора контроля высоты нижней границы облачности, а также процедуры юстировки и калибровки прибора контроля высоты нижней границы облачности.

В третьей главе описаны трудности обработки и приёма сигнала, при использовании полупроводниковых лазерных диодов в оптоэлектронных приборах, связанные с избыточным поступлением фонового излучения на вход прибора контроля высоты нижней границы облачности, приведен разработанный способ уменьшения фона в сигнале прибора контроля высоты нижней границы облачности.

В четвёртой главе описан разработанный программный комплекс для обработки лидарных сигналов и восстановления информации о высоте нижней границы облачности, приведены алгоритмы и используемые методы в программах для микропроцессора, передачи и обработки данных, и программы визуализации результатов расчетов высоты нижней границы облачности.

В заключении сформулированы выводы и перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

1.1 Атмосфера Земли. Тропосфера

Атмосфера Земли представляется состоящей из последовательности нескольких слоев или, точнее, нескольких вложенных одна в другую, оболочек сфер, каждая из которых характеризуется своим ходом изменения температуры в процессе подъема. Различают пять сфер, получивших названия (в направлении от земной поверхности): тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, экзосфера [7, 8].

В пределах тропосферы сосредоточено около 80 % массы земной атмосферы, а в пределах стратосферы – остальные 20 %. Почти вся масса атмосферы находится в 50-километровом слое воздуха, прилегающем к земной поверхности. Естественно, что этот слой воздуха, и прежде всего его нижняя часть, т. е. тропосфера, и определяет погоду на планете [7].

Тропосфера – самая нижняя часть атмосферы, в которой и проявляется наибольшая активность, влияющая на погоду, изучается и исследуется метеорологами с особым интересом. Толщина тропосферы в среднем составляет около 12 км, но может быть 9 км и ниже в полярных областях и более 16 км в тропиках [9].

1.1.1 Приземный атмосферный слой

Тропосферу разделяют ещё на два подслоя – приземный атмосферный слой и верхнюю тропосферу. Приземный атмосферный слой – это слой воздуха, непосредственно взаимодействующий с поверхностью планеты. Высота приземного слоя обычно составляет до двух километров от поверхности земли и достаточно динамично меняется от различных факторов, таких, например, как скорость ветра, сезон, рельеф подстилающей поверхности. А верхнюю часть пограничного слоя определяют как высоту, на которой происходят резкие повышение температуры и внезапное падение концентрации водяного пара и твердых частиц, а также большинства микрохимических видов [10].

1.2 Типы облаков, их классификация и влияние на климат

Облака принадлежат к числу важнейших атмосферных метеорологических явлений и играют определяющую роль в формировании погоды и климата, в распространении растительного и животного мира на Земле. Изменяя радиационный режим атмосферы и земной поверхности, облака оказывают заметное воздействие на температурно-влажностный режим тропосферы и приземного слоя воздуха, где протекает жизнь и деятельность человека.

Облаком называют видимую совокупность взвешенных в атмосфере и находящихся в процессе непрерывной эволюции капель и/или кристаллов, являющихся продуктами конденсации и/или сублимации водяного пара на высотах от нескольких десятков метров до нескольких километров [11].

Из-за многообразия форм и микрофизических свойств облаков, их происхождения и поведения, несмотря на многовековое наблюдение за облаками, нет единой классификации облаков.

1.2.1 Фазовый состав облаков

Существует деление облаков по фазовому строению:

1. Водяные, состоящие только из капель радиусом 1–2 мкм и более. Так как капли могут существовать не только при положительных, но и при отрицательных температурах. В последнем случае капли будут находиться в переохлажденном состоянии, что в атмосферных условиях вполне обычно. Чисто капельное строение облака сохраняется, как правило, до температур порядка $-10...-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (иногда и ниже).

2. Смешанные, состоящие из смеси переохлажденных капель и ледяных кристаллов при температурах $-20...-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Ледяные, состоящие только из ледяных кристаллов при достаточно низких температурах (порядка $-30...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) [11].

1.2.2 Формы облаков

Классификация тропосферных облаков по внешнему виду, используемая в настоящее время, получила название международной морфологической классификации. В соответствии с ней облака делятся на 10 основных форм [9].

В каждой основной форме облаков различают виды и разновидности. Облака всех форм встречаются на высотах от нескольких десятков метров до тропопаузы. В этом диапазоне высот условно различают облака трех ярусов [11].

Рисунок 1.1 отображает основные формы и распределение по высотам облаков.

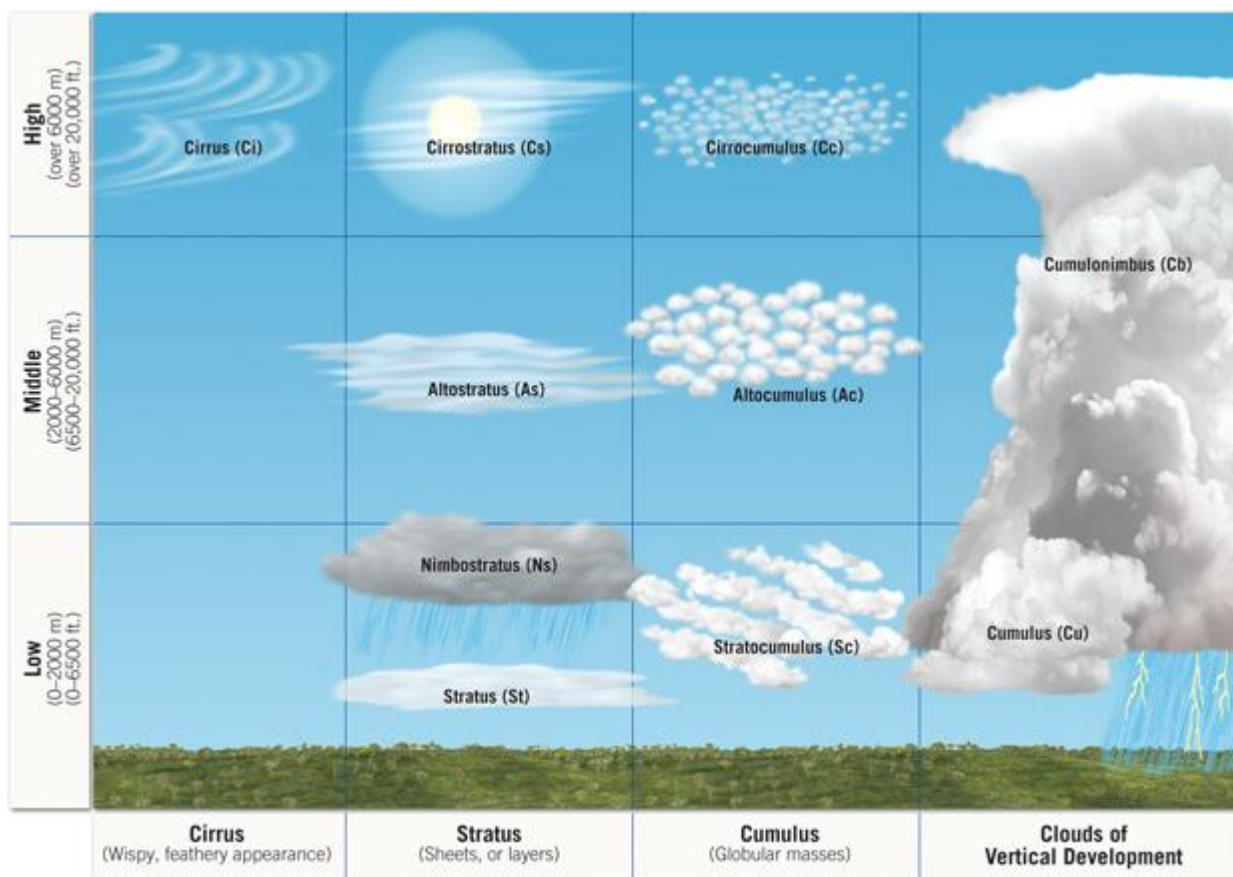


Рисунок 1.1 – Формы облаков [9]

Облака классифицируются в зависимости от того, как они выглядят, если смотреть с поверхности Земли. Существует три основные формы или фигуры: перистые, кучевые и слоистые облака [9].

Перистые (усиковидные) облака высокие, белые и тонкие. Они образуют нежные вуалеобразные пятна или пряди и часто имеют перистый вид. *Cirrus* в переводе с латыни означает «завиток» или «нить».

Кучевые (кучевообразные) облака состоят из шаровидных облачных масс, похожих на ватные шарики или овец на небе. Обычно кучевые облака имеют плоское основание и выглядят как поднимающиеся купола или башни. Кучевые облака на латыни означает «Cumulus» или «куча». Кучевые облака образуются в

слое атмосферы, где существует некоторая неустойчивость, приводящая к конвекции и подъему воздуха [9].

Слоистые облака состоят из листов или слоев, которые покрывают большую часть или все небо. Хотя в слоях могут быть небольшие разрывы, отдельных облачных единиц нет. Слоистые облака образуются, когда атмосфера стабильна.

Все облака имеют по крайней мере одну из этих трех основных форм, а некоторые представляют собой комбинацию двух из них; например, слоисто-кучевые облака в основном представляют собой пластинчатые структуры, состоящие из длинных параллельных рулонов или разорванных шаровидных пятен. Кроме того, термин нимб (лат. «сильный дождь») используется в названии облака, которое является основным производителем осадков. Nimbostratus обозначает низкое, относительно плоское дождевое облако, тогда как кучево-дождевое облако описывает массивное, высокое дождевое облако [9].

Формы облаков также включают перистые (тонкие), кучевые облака (шаровидные массы) и слоистые (листы или слои).

1.2.3 Высота облаков

Второй аспект классификации облаков – высота, предусматривает три уровня: высокий, средний и низкий, как показано на рисунке 1.1. Высокие облака формируются в самой высокой и холодной области тропосферы и обычно имеют основание выше 6000 метров. Температура на этих высотах обычно ниже нуля, поэтому высокие облака, как правило, состоят из кристаллов льда или капель переохлажденной воды.

Средние облака находятся на высоте от 2000 до 6000 метров и могут состоять из капель воды или кристаллов льда, в зависимости от времени года и температурного режима атмосферы.

Облака нижнего яруса формируются ближе к поверхности Земли на высоте около 2000 метров и, как правило, состоят из капель воды, за исключением зимнего периода. Эти высоты могут несколько варьироваться в зависимости от времени года и широты. Например, в высоких (полярных) широтах и в холодные зимние месяцы высокие облака обычно встречаются на более низких высотах. Кроме того,

некоторые облака простираются вверх, охватывая более одного диапазона высот, и называются облаками вертикального развития [2].

1.2.4 Состояние неба

Количество облачности обычно указывается как состояние неба [12]. Количество облаков по всему видимому небосводу оценивается визуально по 10-балльной шкале. При полном отсутствии облаков или при наличии облаков, занимающих менее 10% от всего неба, записывается 0 баллов. Количество облаков, покрывающих приблизительно 0.1 часть небосвода, оценивается 1 баллом, 0.2 – 2 баллами, 0.3 – 3 баллами и т.д. При полном покрытии небосвода ставится 10 баллов [13], [14].

В свою очередь количество облачности для автоматизированных наблюдений определяется в процентах. Однако несмотря на то, что автоматические наблюдения широко заменили визуальные наблюдения, эта структура категоризации состояния неба по-прежнему широко используется, использование специальных алгоритмов позволяет получить балл облачности из данных о высоте нижней границы облачности.

1.2.5 Облака и радиационный бюджет Земли

Различные типы облаков в разных условиях по-разному влияют на общее количество энергии в системе атмосфера-поверхность. Два радиационных процесса определяют основное влияние облаков на радиационный бюджет Земли.

Первый из них – эффект альбедо, который заключается в отражении коротковолновой (в основном видимой или близкой к видимой) попадающей на облака солнечной радиации и, следовательно, в уменьшении количества проходящей через них солнечной энергии. Альбедо облаков нелинейно зависит как от концентрации ядер конденсации облаков, так и от фазового состояния этих ядер [15].

Второй радиационный процесс – это парниковый эффект, при котором облака препятствуют уходу энергии через атмосферу в космос путем поглощения и испускания длинноволнового инфракрасного излучения.

По данным, приведенным в литературе, чистым глобальным радиационным воздействием облаков является охлаждение земной поверхности на $13,2 \text{ Вт/м}^2$ [16, 17]. Однако перистые облака, в зависимости от их состава, могут либо задерживать уходящее инфракрасное излучение Земли за счет парникового эффекта, либо отражать приходящее солнечное излучение за счет эффекта альбедо. Недостаток знаний о перистых облаках и процессах, которые их создают, требует больших допущений при моделировании общей циркуляции [18]. Это, в свою очередь, приводит к значительной неопределенности в отношении их роли в меняющемся климате, вплоть до того, что неясно, как, положительно или отрицательно они реагируют на изменение температуры.

1.3 Аэрозоли

На климат Земли также влияет деятельность человека, увеличивающая содержание аэрозолей в атмосфере. Аэрозоли - это газообразные взвеси твердых и жидких частиц [19]. Согласно общепринятой практике в науках об атмосфере, к аэрозолям относятся все жидкие и твердые частицы, за исключением гидрометеоров, таких как облачные капли, капли дождя и кристаллы льда. Размер аэрозолей в атмосфере варьируется от нескольких молекул до более чем 100 мкм в диаметре. В отличие от капель воды в облаках, аэрозоли можно обнаружить в относительно сухом воздухе. Природные источники аэрозоля многочисленны и включают такие явления, как лесные пожары, пылевые бури, приливные волны и извержения вулканов. В отличие от них, большинство антропогенных аэрозолей образуется в результате выброса диоксида серы при сжигании ископаемого топлива и выжигании растительности для сельскохозяйственных нужд. Химический состав атмосферы преобразует диоксид серы в сульфатные аэрозоли – те же вещества, которые образуют кислотные осадки [20].

Большинство аэрозолей действуют напрямую, отражая солнечный свет в космос, и косвенно, делая облака "ярче". Разница между мелкими (менее 1 мкм) и крупными (более 1 мкм) аэрозолями значительна [21]. Тонкодисперсные аэрозоли образуются в основном путем конденсации. Переходные аэрозоли ядерного типа обычно наблюдаются в виде свежесгоревших аэрозолей [22]. Накапливающиеся

аэрозоли – это более мелкие аэрозоли, которые растут за счет аккреции, конденсации или сгорания ядерных аэрозолей и обычно остаются в атмосфере в течение нескольких дней. С другой стороны, крупные аэрозоли, такие как пыль и морской аэрозоль, образуются в основном за счет механических процессов. Они, как правило, быстро оседают, но время их пребывания в атмосфере значительно варьируется [23].

Аэрозоли также требуют изучения методами дистанционного зондирования. Кроме того, аэрозоли оказывают охлаждающее воздействие на климат, а также служат местами зарождения облаков, что еще больше влияет на климат [9].

Поэтому необходимо проведение исследований, позволяющих лучше понять процессы образования, переноса, удаления и химического состава аэрозолей, а также их взаимодействие с облаками.

1.4 Лидарное зондирование атмосферы

Лидарные методы диагностики находят широкое применение для определения характеристик атмосферы [24] – от определения свойств облачных частиц [25],[26] или аэрозолей [27] до профилирования следовых концентраций газов [28],[29], температуры воздуха [30] или скорости ветра [31],[32].

1.4.1 Конфигурации лидарных систем

Типичный лидар состоит из двух подсистем: лазерного излучателя и приемника. Лазерный излучатель может состоять только из лазерного источника или включать дополнительные компоненты, такие как оптика для расширения луча [33]. Приемник обычно представляет собой телескоп, детектор которого расположен в фокальной плоскости, но может находиться на некотором расстоянии от неё [34]. Лидарные системы могут быть устроены по-разному, как будет рассмотрено ниже, но основными типами конфигураций являются двухосевые, где лазерный излучатель находится близко к приемнику, иногда немного наклонен относительно него, а лазерный луч использует зеркало и/или светоделитель [33], и коаксиальные, в которых оптические оси лазерного пучка и приёмника совпадают [35].

1.4.2 Лидар упругого обратного рассеяния

Одним из инструментов, используемых для изучения облаков и аэрозолей, является лидар упругого обратного рассеяния. Под упругим обратным рассеянием света понимается взаимодействие света с рассеивающей средой, при котором свет заданной длины волны рассеивается без изменения энергетического состояния атомов или молекул рассеивателя. Для молекул или очень маленьких частиц процесс рассеяния может быть описан теорией рэлеевского рассеяния [36], в то время как для частиц с размерами, близкими или превышающими длину волны рассеянного света, процесс может быть описан теорией Ми [37]. При распространении в атмосфере зондирующего излучения лидаров упругого обратного рассеяния могут происходить процессы спектрального поглощения и возбуждения, а также сдвиг длины волны из-за доплеровского уширения движущимися рассеивателями. Однако при исключении влияния селективного поглощения спектральных линий атмосферных составляющих на корректно выбранных лазерных длинах волн вклад этих процессов в канал упругого рассеяния обычно не рассматривается. Вместе с тем, широкополосное поглощение является важным фактором, который учитывается во всех лидарных системах.

Несмотря на недостаточное спектральное разрешение, из лидарных данных об упругом рассеянии атмосферы можно получить огромное количество информации, особенно если известна дополнительная информация, например, экстинкция в определенных положениях профиля во время диагностики. В общем случае экспоненциальное уменьшение сигнала обратного рассеяния с дальностью указывает на наличие чисто молекулярной атмосферы, а отклонения от этого экспоненциального профиля указывают на присутствие более сильно рассеивающих аэрозолей или облачных капель на дальности, соответствующей этим отклонениям [38].

Если известны рассеивающие свойства частиц в зондируемом объеме, то для определения концентрации частиц в атмосфере можно эффективно использовать лидары упругого рассеяния [33].

Ослабление в однородной поглощающей среде (атмосферу с учётом некоторых допущений можно считать таковой) монохроматического параллельного пучка света, а к источникам света с такими характеристиками можно отнести лазеры, используемые в лидарах, определяется физическим законом Бугера – Ламберта – Бера, который можно записать в виде:

$$P(R) = P_0 e^{-k_\lambda R}, \quad (1.1)$$

где $P(R)$ – оптическая мощность света, прошедшего слой вещества толщиной R , P_0 – мощность света на входе в вещество, k_λ – показатель поглощения среды на длине волны λ .

Лидар упругого рассеяния можно использовать для определения размера капель с помощью высоты основания облаков [39], оценки видимости [40] и различных полей зрения приемника [33]. Он также может быть использован для определения типа осадков на основе формы возмущения зондирующего импульса [41]. В областях атмосферы, не содержащих облаков или аэрозолей, интенсивность обратного рассеяния является мерой плотности, которая может быть использована для определения температуры [42]. Лидар упругого рассеяния – самый простой тип лидаров, но их сигналы, как правило, сложнее всего инвертировать, поскольку два параметра (ослабление и обратное рассеяние) обычно должны быть получены из одного сигнала (зарегистрированной интенсивности обратного рассеянного излучения).

1.4.3 Деполяризационный лидар

Одним из важных дополнительных методов, который может быть применен в системах упругого рассеяния, является регистрация деполяризации. Ориентация ортогональных электрических и магнитных составляющих распространяющихся световых волн определяет их поляризацию. Если лазерное излучение, передаваемое упругой лидарной системой, сильно поляризовано, а приемник оснащен техническим средством (например, поляризационным разделителем луча) для разрешения поляризации возвращающегося света, то можно определить степень деполяризации обратного рассеянного света и получить некоторое представление о форме рассеивающих частиц. В то время как сферические капли

не сильно изменяют поляризацию рассеиваемого ими света, несферические частицы, такие как кристаллы льда, изменяют поляризацию [18].

Деполяризационный лидар, определяет соотношение поляризации света, рассеянного обратно из объема, освещенного поляризованным лазерным излучением. В частности, он определяет степень смещения поляризации света по отношению к поляризации лазера. Применение метода деполяризации может дать важную информацию о форме рассеивателей в атмосфере. Кроме того, если известна зависимость между обратным рассеянием и ослаблением в зондируемом объеме, этот метод можно использовать для определения типа облаков [43],[44].

1.5 Лидарные методы определения высоты нижней границы облачности

В настоящее время существует множество определений термина "высота нижней границы облаков", некоторые из которых были окончательно оформлены в официальных документах, другие созданы в научных кругах. Среди этих терминов есть такие, которые важны в конкретных областях знаний и характеризуют определенные физические свойства облаков, которые являются сложным, многогранным природным явлением.

Рисунок 1.2 показывает шесть характерных точек в лидарном сигнале (кривая 2), которые можно принять за высоту нижней границы облачности при определенных критериях как указывает его автор (Шаманаев В. С.).

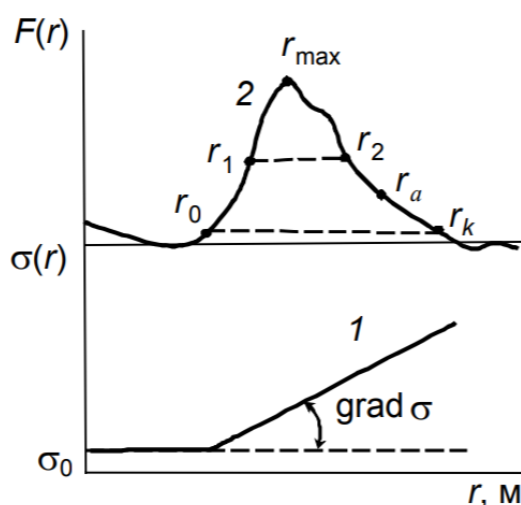


Рисунок 1.2 – Лидарное определение высоты нижней границы облачности [5]

1 – модельный профиль коэффициента рассеяния, 2 – лидарный сигнал

Поэтому было признано, что наиболее подходящее определение высоты нижней границы облаков может варьироваться в зависимости от области применения. В случае индикаторов высоты нижней границы облаков, используемых в авиации, приоритетным является соотнесение высоты нижней границы облаков с видимостью для человека, что является наивысшим приоритетом для пилотов при обнаружении ориентиров. Это означает, например, что видимость основания облака сильно зависит от угла обзора как показано на рисунке 1.3, из-за различий в длине световых путей в облаке и относительно прозрачной атмосферы под облаком в вертикальном и наклонном (горизонтальном) направлениях [40, 45].

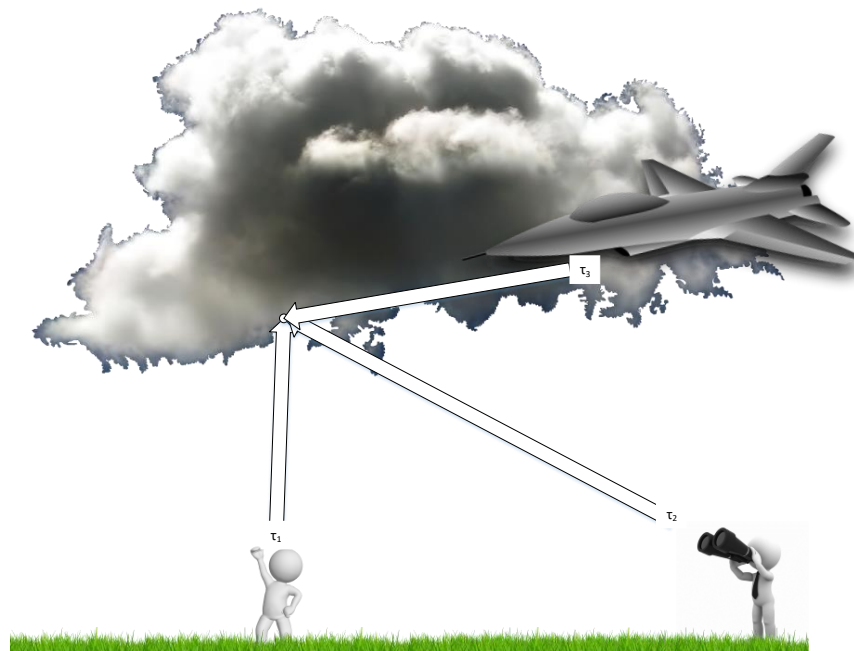


Рисунок 1.3 – Оптическая толща для вертикальных и наклонных трасс

Поскольку пропускание атмосферы и облаков зависит от длины волны, если длина волны лазера находится в невидимой для человеческого глаза области спектра, сигнал должен быть нормирован относительно видимого диапазона, если мы должны спрогнозировать видимость для человека на трассе [40, 45].

Поэтому для определения высоты границы облака, особенно если она используется для определения высоты принятия решения пилотом при взлете или посадке в авиации, нужно комплексно подходить к обработке сигнала. Рассмотрим методы определения высоты границы облака по сигналам лидара.

1.5.1 Метод обнаружения максимума сигнала

Метод обнаружения максимума выполняется путём поиска в лидарном сигнале точки с пиковой интенсивностью и последующим присвоением этой высоте значения высоты нижней границы облаков. Так как в данном методе выполняется поиск точки самого высокого уровня сигнала, этот метод является наименее чувствительным к воздействию шума. Ввиду простоты данный подход считается базовым и также используется при прожекторном зондировании [40, 45].

В сравнительном исследовании наземных приборных и бортовых визуальных наблюдений, подтверждается, что пики зарегистрированных лидарных сигналов хорошо согласуются друг с другом и с надирных отчетов пилотов [46].

Тем не менее, при регистрации облаков на высоте от 160 до 3200 м, было обнаружено, что пики сигналов от наземного прибора были в среднем на 79 м выше облака при сравнении с отчетами пилотов при типичном заходе на посадку с углом 3 градуса ниже горизонтали. Таким образом, пилоты потеряли визуальный контакт с землей значительно ниже высоты пика сигнала. Это также подтверждается ранними работами, в которых поясняется, что, поскольку этот метод основан на упрощенной модели определения высота границы облаков, то могут возникать случаи со значительными ошибками восстановления значения высоты нижней границы облачности в тех случаях, когда облачность не является ни вертикально, ни горизонтально однородной [40, 45].

1.5.2 Метод поиска перехода через нуль первой производной

Одним из способов поиска точки начала рассеяния излучения назад от облака является анализ изменения в динамике лидарного сигнала [5]. Этот алгоритм следит за первой производной сигнала с целью обнаружения самых незначительных изменений в сигнале за счёт градиента рассеяния в облаке и чистой атмосфере. Алгоритм основан на следующих соображениях: отраженный сигнал в ясной атмосфере должен уменьшаться по экспоненциальному закону (за счёт поглощения излучения атмосферой), присутствие же большого количества частиц аэрозоля в облаке должно приводить к увеличению обратного рассеяния [45].

Высота нижней границы облаков может быть определена как точка, где первая производная сигнала проходит через ноль, чтобы стать положительной. Преимущество этого алгоритма состоит в том, что он позволяет обнаруживать облачные слои для различных типов и плотности облаков. На рисунке 1.4 показан лидарный сигнал (сплошная линия), и его первая производная (точки) [45].

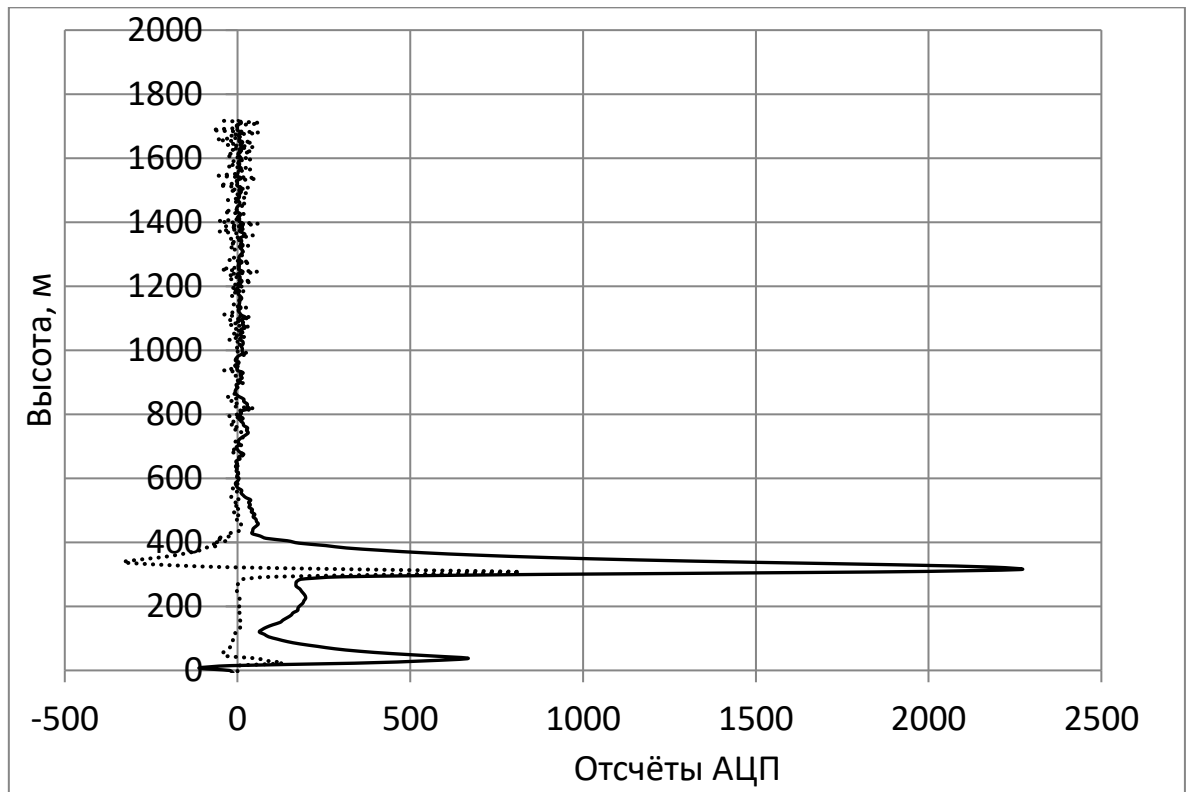


Рисунок 1.4 – Лидарный сигнал и его производная

Важно отметить, что при наличии шума или незначительно изменяющегося сигнала может происходить ложное детектирование облачного слоя. Этих ошибок можно избежать путём применения фильтрации и обнаружением нескольких рядом стоящих слоёв в один слой облачности. Также данный метод обнаружения не оптимален для сигналов, которые не показывают монотонное уменьшение в чистой атмосфере, в условиях тумана, осадков или для сигналов от облаков, которые не показывают резкое увеличение сигнала от нижней границы облаков [47].

В сигналах с высоким уровнем шумовой составляющей также будет затруднительно определить высоту нижней границы облаков с применением данного метода [45].

Помимо установки минимального количества последовательных слоёв, представленные проблемы можно было бы частично решить путем изменения порогового значения для производной. Для работы в условиях высокого шума этот порог может быть некоторым малым положительным числом, либо для облаков с низкой оптической плотностью порог может принимать отрицательное значение, в том случае если отклик от облака недостаточно велик, чтобы преодолеть порог экспоненциального убывания сигнала [45].

1.5.3 Метод определения зон

Существует методика обнаружения высоты нижней границы облачности на краю области перехода из зоны чистой атмосферы, в зону с сигналами в облаке [48]. Сначала, разделяют всю трассу на зоны чистой атмосферы, и зоны с облачным слоем, на основе экспериментально полученного порога. Затем сигналы зон чистого неба усредняются для вычисления рассеяния чистой атмосферы. Коэффициенты молекулярного ослабления и обратного рассеяния α и β вычисляются с использованием известных давления и температуры атмосферы, применяются для калибровки сигнала из чистого воздуха и учёта изменений в конструкции лидара, мощности импульса, перекрытия полей зрения лазерного пучка и приемного телескопа, чувствительности лидара и так далее [45].

Для определения высоты нижней границы облачности коэффициент обратного рассеяния $\beta(R)$ определяется из лидарного уравнения, а высота нижней границы облачности определяется как точка в сигнале на высоте, где величина коэффициента обратного рассеяния превышает экспериментальный, и установленный заранее, порог [45].

Этот метод может быть эффективным для исследований в географических областях, где лидарное соотношение чистой атмосферы может быть получено, например, с помощью радиозонда, или смоделировано с достаточной точностью.

Для лидара с низкой чувствительностью к молекулярному рассеянию, такой подход вряд ли будет хорошо работать, так как могут потребоваться часы усреднения для получения профиля ясного неба. Кроме того, этот метод лучше всего подходит для обработки только большого числа данных, что является

проблематичным, когда требуется обеспечить выдачу информации в режиме реального времени [45].

Определение высоты нижней границы облаков на основе порогового значения для коэффициента обратного рассеяния, во многом схож со следующим методом [45].

1.5.4 Метод определения видимости

Существует способ определения высоты нижней границы облаков на основе горизонтальной видимости [49]. Предварительно определяют коэффициенты пропускания α , например, так называемым методом Клетта. Это наиболее широко используемый метод для решения обратной задачи для анализа лидарных сигналов. Этот метод, хотя и разработали в аналогичной форме и опубликовали Кауль в 1977 году [50] и Зуев в 1978 году [51], в западной литературе носит фамилию Клетта, который ввел его в 1981 году [52]. В этом методе коэффициент ослабления в дальней зоне принимается на основании модели или других априорных данных, и сигнал итерационным методом восстанавливается от конечной точки получения информации в сторону земли. Такой подход обеспечивает стабильный результат при наличии аэрозоля или присутствии облачности и поэтому именно данный метод обычно применяется в приборах контроля высоты нижней границы облаков [45],[53].

Так как видимость может быть определена для порога яркости контраста человеческого глаза, в зависимости от пропускания, с использованием закона Кошмидера, то горизонтальную видимость на каждой высоте можно вычислить из инвертированного сигнала. Хотя очевидно есть различия в воспринимаемой контрастности в дневное и ночное время, типичный визуальный уровень контрастности Всемирной метеорологической организации и Международная организация гражданской авиации составляет 5% [54],[55],[45].

Закон Кошмидера для определения метеорологической оптической дальности основан на уравнении, вытекающем из закона Бугера-Ламберта-Бера (формула (1.1)) который можно записать как:

$$F = F_0 \cdot e^{-\sigma l} \quad (1.2)$$

где F - световой поток, принимаемый после прохождения в атмосфере пути длиной l ; F_0 - поток при длине $l=0$; σ - показатель ослабления [56].

Следует учитывать, что этот закон действителен только для монохроматического света, однако может приниматься с хорошей аппроксимацией и для спектрального потока света [56].

Из определения коэффициента пропускания следует

$$\tau = \frac{F}{F_0} \quad (1.3)$$

а из соотношений (1.2) и (1.3)

$$\tau = e^{-\sigma l} \quad (1.4)$$

Поскольку за метеорологическую оптическую дальность (MOR – meteorological optical range) принимается длина пути светового луча в атмосфере, на котором световой поток ослабляется до 0,05, уравнение (1.4) преобразуется в математическое соотношение:

$$MOR = \frac{1}{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{1}{0.05}\right) \quad (1.5)$$

Вытекающая из уравнений (1.2) и (1.5) формула Кошмидера является основной для вычисления метеорологической оптической дальности с учетом принятого значения порога контрастной чувствительности глаза, равного 0,05, по полученному коэффициенту пропускания для длины пути луча в атмосфере:

$$MOR = 1 \cdot \left(\frac{\ln(0.05)}{\ln(\tau)} \right) \quad (1.6)$$

Применяя этот порог и при предположении о горизонтальной однородности на каждой высоте, рассчитывается горизонтальная видимость в зависимости от высоты для найденного профиля. Затем применяются эмпирически полученные пороговые значения для горизонтальной видимости и наклон горизонтальной видимости для определения высоты нижней границы облаков с применением лидарных сигналов [45],[56].

В обзоре рассмотрены далеко не все возможные и используемые методы определения высоты нижней границы облаков из лидарных сигналов, но несмотря на многообразие методов, наиболее информативным и, соответственно, подходящим для решения задач по метеорологическому обеспечению техническими средствами аэродромов является метод определения вертикальной дальности видимости. Эта методика связывает высоту нижней границы облаков с видимостью, что делает её пригодной для использования в авиации. А так как методика определения вертикальной дальности видимости опирается на оптические свойства атмосферы, она также может использоваться для метеорологических и исследовательских целей.

1.6 Системы контроля высоты нижней границы облачности

Первый патент на лазерный прибор для диагностики высоты нижней границы облачности был подан в 1974 году [57]. После постепенной замены вращающихся лучей прожекторов [58] на коммерческие безопасные для глаз лидарные системы, способные оценить высоту основания облаков и сообщать о вертикальной видимости, эти системы стали стандартными инструментами атмосферных исследований [59]. Эти приборы, широко используемые в авиации и метеорологии, обычно передают короткие, маломощные лазерные импульсы ближнего инфракрасного диапазона с высокой частотой повторения, чтобы соблюсти правила безопасности для глаз. Длина волны 905 нм обычно используется по нескольким причинам. Во-первых, модельное пропускание атмосферы составляет порядка 0,6 на длине волны 905 нм. Во-вторых, недорогие лазерные диоды с достаточной выходной мощностью на 905 нм и кремниевые лавинные фотодиоды (ЛФД) с высокой чувствительностью на этой длине волны обеспечивают возможность создания приборов на основе данных компонентов коммерчески доступными. Наконец, правила авиационного приборостроения требуют, чтобы лазерное излучение, передаваемое вверх от датчиков, расположенных вблизи аэродромов, было невидимым, чтобы не мешать пилотам видеть.

1.6.1 Облакомеры CL31, CL51, CL61

Расположенная в Финляндии фирма, Vaisala Oyj. выпускает 3 модели облакомеров. Рисунок 1.5 демонстрирует внешний вид облакомеров.



Рисунок 1.5 – Облакомеры CL31, CL51, CL61 (слева направо)

Модель CL31 обнаруживает одновременно три слоя облаков на расстоянии до 7,6 км и генерирует набор данных, включая оценку инверсионных слоев и стабильных в ночное время слоев ниже 200 метров[44].

Модель CL51 предназначена для профилирования высоты перистых облаков на большом расстоянии, которое также включает данные об облаках нижнего и среднего слоев, а также вертикальную видимость. Он имеет дальность обнаружения до 15 км [39, 60].

Лидарный деполяризационный облакомер CL61 обеспечивает возможность различить фазовое состояние частиц аэрозоля, учитывает и нивелирует эффекты поглощения водяным паром [44].

1.6.2 Датчик облаков лазерный ДОЛ-2

Датчик облаков лазерный ДОЛ-2 предназначен для непрерывного дистанционного контроля высоты нижней границы облачности, обработки и документирования результатов. Рисунок 1.6 отображает внешний вид датчика производства ООО "ЛОМО МЕТЕО", г. Санкт-Петербург, РФ [61].



Рисунок 1.6 – Датчик облаков лазерный ДОЛ-2

Датчик может функционировать как обособленное устройство, так и в составе автоматизированной метеорологической станции. Диапазон регистрации высоты нижней границы облачности от 10 до 3000 м.

1.6.3 Облакомер CHM 15k „NIMBUS“

Облакомер CHM 15k имеет корпус с двойными стенками в сочетании со встроенным вентилятором и автоматической системой обогрева. Таким образом, он обеспечивает надежную защиту от запотевания, осадков, замерзания или перегрева, фильтров с узкой полосой пропускания и высокочувствительных фотодетекторов. Рисунок 1.7 отображает внешний вид CHM 15k.



Рисунок 1.7 – Облакомер CHM 15k

Основные характеристики CHM 15k: дальность до 15 км, оптимизированное обнаружение нескольких облачных слоев, модульная конструкция устройства,

различные форматы хранения данных, включая необработанные данные, интерфейсы: RS485, LAN, RS232, Modem V.21, V22 [62].

1.6.4 Лидар SkyVUE 8

Лидар SkyVUE 8 производства CAMPBELL SCIENTIFIC LTD. (Великобритания) предназначен для регистрации высоты нижней границы облачности (ВНГО) и вертикальной видимости в аэропортах, на вертолетных площадках (на суше или в открытом море) и других метеорологических приложениях. Рисунок 1.8 отображает конструкцию SkyVUE 8.



Рисунок 1.8 – Лидар SkyVUE 8

Основные характеристики и отличия SkyVUE™8: радиус действия 8 км, наклонное основание и двухосный инклинометр для автоматической корректировки высоты облака, встроенный обогреватель, воздуходувка, солнцезащитный фильтр, резервная батарея [63].

1.6.5 Прибор R-Man 510

Компания Leosphere, расположенная во Франции, создала прибор R-Man 510 Super Ceilometer, внешний вид которого показан на рисунке 1.9. Этот прибор основан на Nd:YAG лазере с длиной волны излучения 355 нм. Помимо регистрации интенсивности упругого обратного рассеяния, этот прибор может предоставлять информацию о форме рассеивателей благодаря использованию канала деполяризации. Он также включает канал комбинационного рассеяния на азоте,

который используется для калибровки молекулярного сигнала, необходимого для повышения точности решения обратной задачи.



Рисунок 1.9 – Прибор R-Man 510

Данный прибор разработан специально для точной оценки концентрации вулканического пепла в целях обеспечения авиационной безопасности [64, 65]. Диапазон работы прибора – 4,5 м - 20 км.

1.6.6 Датчики высоты облаков ДВО-2, ДВО-3Л

Компания "АО ЛЗОС" выпускает как разработанный в СССР датчик высоты облаков ДВО-2, так и ДВО-3Л, анонсированный в 2019 году [66].

ДВО-2 предназначается для дистанционной оценки нижней границы облаков, автоматической обработки данных, передачи выходных сигналов для регистрации и на дистанционный пульт для отображения. На рисунке 1.10 показан внешний вид одного из блоков ДВО-2.



Рисунок 1.10 – ДВО-2

ДВО-2 – это импульсный дальномер оптического диапазона, который выдает вертикальное расстояние от земли до нижней границы облаков. Высота облаков вычисляется путём измерения времени прохождения светового импульса от излучателя до нижней границы облаков. Датчик высоты облаков ДВО-2 включает в себя: передатчик и приёмник, размещённые рядом с основным пунктом наблюдений и на ближних приводных радиомаяках с обоих концов взлётно-посадочной полосы, линию связи, блок для сбора и обработки информационных данных и дистанционный пульт управления, размещённый на основном пункте наблюдений.

На рисунке 1.11 показан внешний вид комплекта ДВО-3Л.



Рисунок 1.11 – Комплект ДВО-3Л

Прибор представляет собой лазерный импульсный дальномер, выдающий вертикальное расстояние от земли до нижней границы облаков. Прибор состоит из передатчика, приемника, модема и панели оператора. Диапазон высоты от 15 м до 3000 м [67].

1.6.7 Облакомер СВМЕ80

Облакомер СВМЕ 80 представляет собой автономный прибор, предназначенный для стационарных и мобильных установок, где требуется точная и надежная информация о высоте облаков. Рисунок 1.12 отображает внешний вид СВМЕ 80.



Рисунок 1.12 – Облакомер СВМЕ 80

Светоизлучающий элемент данной системы представляет собой диодный лазер с низким уровнем энергопотребления, выходная мощность которого ограничена безопасным для глаза уровнем. В процессе регистрации сигналов используется технология оцифровки в режиме реального времени, а микропроцессор INTEL 80186 используется для обработки этого сигнала.

В СВМЕ 80 имеются разъемы для различных типов дисплеев и записывающих устройств. Интерфейс RS-232C поддерживает локальное управление, тестирование и сбор данных. Для дистанционного управления и сбора данных имеется модем FSK. Встроенная система тестирования указывает на сбои в случае неисправности. Электроника расположена в двух легко заменяемых блоках, то есть в модуле питания и печатной плате принтера. Блоки, а также лазерный диод, который размещен в печатной плате, могут быть заменены, как запасные части без настройки или повторной калибровки.

1.7 Выводы

Одним из первых применений лидара было его использование в метеорологии, и, в частности, для определения высоты нижней границы облачности [41]. Использование мощных импульсных лазеров вместо импульсных ламп позволило существенно улучшить точность облакомеров. Использование мощных лазеров сопряжено с мерами защиты персонала, определяемыми его классом безопасности. Использование полупроводниковых лазеров с классом

безопасности для глаз 1 или 1М (как у лазера в проигрывателе компакт-дисков) позволяет устанавливать и применять приборы без дополнительных мер предосторожности в отношении контроля доступа к излучению и делает установку и техническое обслуживание датчика более безопасными. По мнению Международной организации гражданской авиации, (ИКАО): «Единственным автоматическим датчиком, способным в настоящее время измерять высоту нижней границы облаков, является облакомер. Во всех последних моделях в качестве источника света используется лазерный диод» [59].

Сводные характеристики некоторых серийно производимых в мире приборов для диагностики и контроля высоты нижней границы облачности приведены в приложении А. Подобные приборы производят и в России, но поставляются в основном в Министерство обороны.

В настоящее время в мировой практике активно идет работа по разработке и внедрению нового поколения приборов контроля высоты облаков, базирующихся на современной микроэлектронной технике, обработке больших массивов данных с помощью встроенных микропроцессоров, использовании сложных алгоритмов выделения и интерпретации эхо-сигналов от облачной атмосферы, использовании новых средств зондирования, в частности, полупроводниковых лазеров, а также твердотельных лазеров с использованием в качестве элемента накачки энергии полупроводниковых лазерных диодов. Такие приборы обладают большой функциональностью и могут использоваться для получения других метеорологических данных, которые также могут быть полезны для пилотов и диспетчеров. Внедрение новых приборов в действующую систему метеорологического оборудования может привести к более точным прогнозам погоды и повышению эффективности авиационных операций.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

2.1 Оптические схемы построения лидаров

Простейший способ определения высоты облака состоит в оценке времени, которое требуется метеорологическому воздушному шару, отпущенному с поверхности земли, для достижения основания облака. Высота его равна произведению средней скорости подъема воздушного шара на время полета. Другой способ заключается в наблюдении пятна света, образованного на основании облака направленным вертикально вверх лучом прожектора. С некоторого расстояния от прожектора регистрируется угол между направлением на это пятно и лучом прожектора. Высота облака рассчитывается методом триангуляции подобно тому, как и расстояния при топографической съемке. С появлением мощных импульсных ламп и чувствительных детекторов появилась возможность применения импульсной схемы работы облакомеров, которая заключается в следующем: короткий световой импульс генерируется вертикально вверх, и синхронно запускаемый детектор (ФЭУ) принимает рассеянный назад свет от атмосферы по мере прохождения светового импульса. Разделив скорость распространения света на два (так как излучение проходит до облака и возвращается назад) можно получить высоту нижней границы облачности. Приборы, работающие по такому принципу, хотя и выпускаются, и приобретаются в России до сих пор, имеют существенные недостатки, как, например, малый ресурс ламп и ФЭУ, большую длительность импульса излучения (1-2 микросекунды) не отвечающим современным требованиям по диагностике и контролю высоты нижней границы облачности [68].

Одним из основных критериев, определяющих возможность безопасного осуществления взлета и посадки авиатехники, является высота нижней границы облачности и метеорологическая дальность видимости. В связи с этим бесперебойная работа аэродромного оборудования, обеспечивающая обслуживающий персонал достоверной информацией о величинах этих параметров атмосферы, является необходимым условием безопасности полетов. Поэтому

разработка современных отечественных приборов в этой области является актуальной и важной задачей.

Рассмотрим подробнее варианты построения лидарных схем приборов для диагностики и контроля высоты нижней границы облачности.

2.1.1 Базисная схема

Классическим вариантом построения приёмо-передающего тракта приборов построенных по лидарному принципу является базисный вариант, показанный на рисунке 2.1.

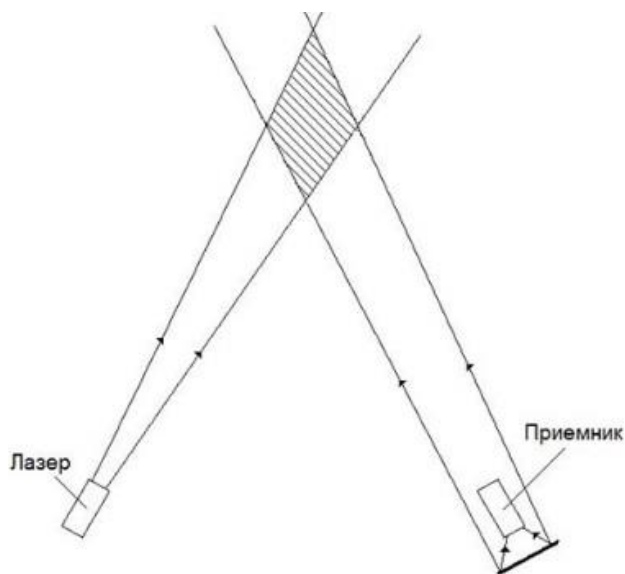


Рисунок 2.1 – Базисная схема

Приемо-передающий блок для регистрации высоты облаков, содержит отдельно выполненные и разнесённые между собой канал генерации излучения, включающий оптически связанные источник излучения и формирующую оптическую систему, и приемный канал, включающий оптически связанные приемник излучения и формирующую оптическую систему [41],[69].

Недостатками данного варианта построения приемо-передающего блока являются большие продольные и поперечные габариты прибора, а также невозможность полного перехвата сигнала на всей трассе зондирования.

2.1.2 Биаксиальная моностатическая схема

На рисунке 2.2 представлена биаксиальная схема, где лазерный пучок входит в поле зрения приемника только на некотором расстоянии.

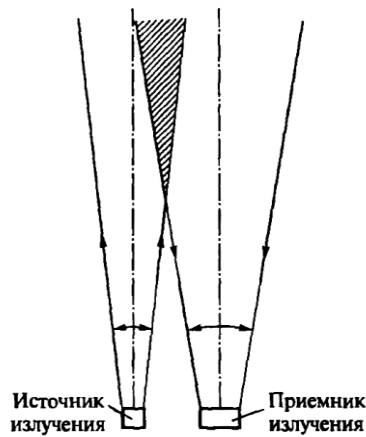


Рисунок 2.2 – Моностатический лазерный лоатор с биаксиальной конфигурацией оптических осей [70]

Такая схема расположения оптических осей источника излучения и приемника позволяет избежать насыщения фотодетектора, вызванного обратным рассеянием излучения в ближней зоне лоатора.

2.1.3 Коаксиальная схема

Второй по частоте и по хронологии использования является коаксиальная схема, показанная на рисунке 2.3, в которой прямо-передающий блок, содержащий канал излучения, аналогично включающий источник излучения, и приемный канал, содержащий приемник излучения и оптическую систему для формирования диаграммы направленности приемника. Однако канал генерации излучения и приемный канал расположены на одной оптической оси.

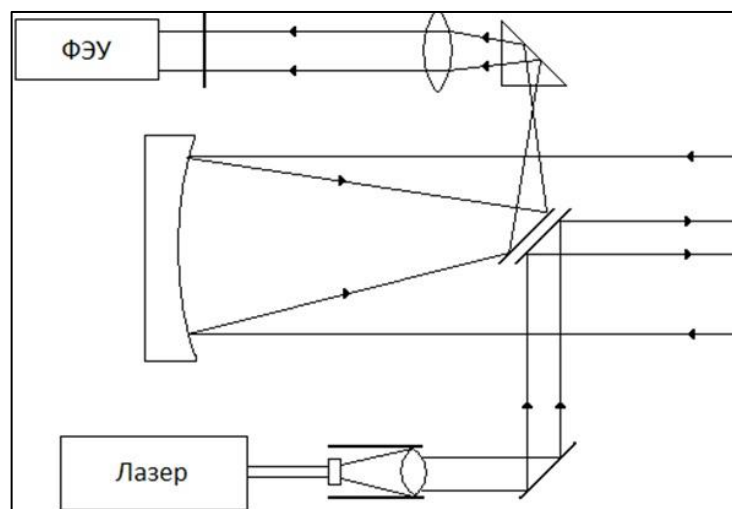


Рисунок 2.3 – Коаксиальная схема

Недостатком данного приемо-передающего блока является сложность конструкции, настройки и большие габариты систем, а также невозможность полного перехвата сигнала на всей трассе зондирования.

2.1.4 Коаксиальная схема с полупрозрачным зеркалом

Рисунок 2.4 представляет развитие предыдущей схемы, которым является коаксиальная схема с полупрозрачным зеркалом

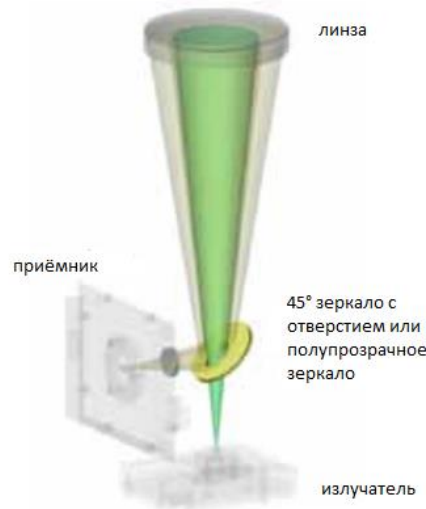


Рисунок 2.4 – Коаксиальная схема с полупрозрачным зеркалом

Приемо-передающий блок прибора контроля нижней границы облаков, включающий источник лазерного излучения и приемник излучения, между которыми расположено под углом 45° к оптической оси плоское зеркало с центральным отверстием, причем приемник излучения оптически связан с формирующей линзой посредством этого плоского зеркала. Также это зеркало может быть полупрозрачным [71].

Недостатком данной схемы является итоговая сложность конструкции, трудоёмкость настройки прибора, а также присутствие в приборе теневой зоны и потеря части мощности зондирующего излучения на полупрозрачном зеркале.

Рассмотрев все варианты решений построения оптической схемы лидарных систем, была выбрана моностатическая биаксиальная схема, т.к. она позволяет при незначительном расстоянии между осями получить перехват из ближней зоны, без

значительной перегрузки приёмного тракта из-за общих оптических поверхностей, как например, в коаксиальной схеме с полупрозрачным зеркалом.

2.2 Математическая модель для расчёта оптической схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности

Известное уравнение лазерной локации (лидарное уравнение) связывает рассеянный сигнал, регистрируемый приемной системой, с коэффициентами обратного аэрозольного рассеяния, аэрозольного ослабления и молекулярного поглощения выражением:

$$P(r) = P_0 \eta \frac{A_r}{r^2} \beta_\pi \frac{\Delta r}{2} \exp\left\{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'\right\}, \quad (2.1)$$

где $P(r)$ - мощность принимаемого сигнала, P_0 - начальная мощность лазерного импульса, η - аппаратная функция лидара, A_r - площадь приемного объектива, r - расстояние до зондируемого объекта, β_π - коэффициент обратного рассеяния, Δr - пространственное разрешение, $\sigma(r')$ - коэффициент ослабления [72].

Величина η включает в себя спектральное пропускание передающей и приемной системы, спектральную чувствительность приемного фотодетектора, а также зависит от области перекрытия поверхности объекта, освещенной лазерным лучом, полем зрения фотоприемника – так называемого геометрического форм-фактора. Поскольку форм – фактор зависит от конструкции приемной оптической системы и, в значительной степени, определяет технические решения по созданию системы, то дальше мы остановимся на нем более подробно [29].

В ближней зоне, локализованной у лидара, коллимированный лазерный луч заполняет поле зрения приемной системы не полностью. Обозначим через r_0 минимальное расстояние, начиная с которого происходит полное перекрытие поля зрения приемной системы и лазерного луча. Тогда лидарное уравнение можно записать в виде:

$$P(r) = P_0 \eta T^2 \frac{A_r}{r^2} \beta_\pi \frac{\Delta r}{2} \exp\left\{-2 \int_{r_0}^r \sigma(r') dr'\right\}, \quad (2.2)$$

где T^2 - пропускание атмосферы в зоне неполного заполнения

$$T = \exp\{-2 \int_0^{r_0} \sigma(r') dr'\} \quad (2.3)$$

Как видно, проблема определения зоны полного перехвата лазерного луча приемной системой является важной с точки зрения применимости уравнения лазерной локации к решению поставленной в настоящем разделе задачи.

2.2.1 Геометрический форм-фактор биаксиальной схемы прибора контроля высоты нижней границы облачности

Общий подход к расчету геометрического форм-фактора биаксиального лидара достаточно подробно описан, отдельно рассматриваются три случая:

1. Расстояние между осями телескопа и лазера в лидаре настолько велико, что перекрывания поля зрения оптической приемной системы и площади, освещаемой лазером в плоскости исследуемого объекта, не происходит.

2. Расстояние между осями телескопа и лазера в лидаре достаточно мало, так что освещенная лазером площадь на плоскости исследуемого объекта полностью, лежит в поле зрения оптической приемной системы

3. Расстояние между осями телескопа и лазера в лидаре таково, что происходит лишь частичное перекрывание поля зрения приемной системы и площади исследуемого объекта, освещаемой лазером [73].

Было отмечено, что хотя коэффициент перекрытия при больших значениях расстояний до объекта зондирования r стремится к единице, тем не менее, даже при небольшом увеличении расстояния между осями телескопа и лазера (например, при 10 %-ном увеличении радиуса объектива или зеркала телескопа), можно добиться, чтобы коэффициент перекрытия был существенно меньше единицы при средних значениях r . Это свойство биаксиальных установок может быть использовано при работе с лидарными системами, предназначенными для зондирования на больших расстояниях, для устранения рассеяния от близлежащих областей, которое может привести к насыщению фотодетектора или даже к его повреждению.

Зависимость коэффициента перекрытия для биаксиального лидара, в котором оси телескопа и лазера расположены под углом друг к другу, резко отличается от аналогичной зависимости в лидарном устройстве с параллельными осями. В этом

случае вначале коэффициент перекрытия увеличивается с возрастанием r , достигает значения единицы и в некотором интервале r сохраняет это значение, а затем при больших значениях r быстро уменьшается до нуля.

Нами разработана методика точного расчета схемы биаксиального лидара, показанной на рисунке 2.5.

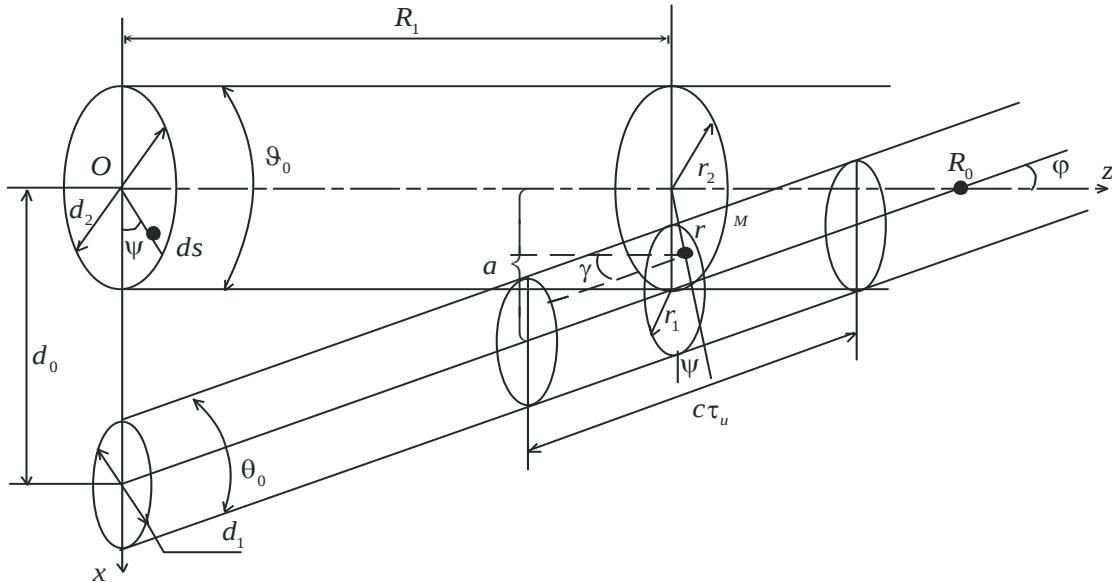


Рисунок 2.5 – Геометрическая схема биаксиального лидара

Геометрические параметры лидара обозначенные на рисунке 2.5: диаметр пучка на выходе коллиматора передатчика d_1 , угловая расходимость θ_0 .

Диаметр приемной оптической системы d_2 , фокусное расстояние f , угол поля зрения $\vartheta_0 = \arctg \frac{d}{f} \approx \frac{d}{f}$.

Если использовать цилиндрическую систему координат, ось z которой совпадает с осью приемной оптической системы, полюс находится в плоскости приемной апертуры, а полярная ось x и оси передающей и приемной систем лежат в одной плоскости. Базовое расстояние между осями оптических систем при $z = 0$ равно d_0 ; угол φ между ними определяет расстояние R_0 , на котором оси пересекаются $R_0 = \frac{d_0}{\tg \varphi}$.

Пусть некоторый элементарный объем $dv = d\sigma dz$, находящийся на расстоянии R_1 и включающий в себя точку $M(r, \psi, R)$, попадает в пучок излучения. Нормальная освещенность E_n этого объема в момент времени t_1 равна

$$E_H(R_1, t_1) = \frac{P_0 f(t_1 - z_1/c)}{S(z_1)} T_1 \quad (2.4)$$

где $z_1 = R_1 / \cos \varphi$; $T_1 = \exp \left[-\frac{1}{\cos \varphi} \int_0^{R_1} \alpha(z) dz \right]$; $S(z_1)$ - площадь сечения пучка излучения на расстоянии z_1 , равная:

$$S(z_1) = \frac{\pi}{4} \left(d_1 + 2z_1 \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2} \right)^2 \quad (2.5)$$

где $\Omega = S_1(r, \psi, R_1) / R_1^2$; $S_1(r, \psi, R_1) = S_1(R_1)$ - эффективная площадь приемной апертуры.

Для лидара с разнесенными оптическими системами рассмотрим методы вычисления площадей S_1 и S_2 . В качестве дополнительного условия примем $d_0 \geq (d_1 + d_2)/2$.

Площадь $S_2(z)$ равна площади взаимного перекрытия пучка излучения и поля зрения приемника в их сечении на расстоянии z . Радиус окружности в сечении пучка излучения подсчитывается по формуле:

$$r_1 = \frac{d_1}{2} + z \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2}, \quad (2.6)$$

центр окружности смещен от оси z на величину a

$$a = |d_0 - z \cdot \operatorname{tg} \varphi|. \quad (2.7)$$

Радиус в сечении поля зрения приемной системы на том же расстоянии равен

$$r_2 = \frac{d_2}{2} + z \operatorname{tg} \frac{\vartheta_0}{2}. \quad (2.8)$$

Площадь перекрытия окружностей рассчитывается по формуле

$$S_2(z) = 2 \left[\int_{a-r_1}^{x_1} \sqrt{r_1^2 - (a-x)^2} dx + \int_{x_1}^{r_2} \sqrt{r_2^2 - x^2} dx \right], \quad (2.9)$$

где $x_1 = (r_2^2 - r_1^2 + a^2) / 2a$.

Не приводя промежуточных выкладок, запишем окончательные выражения:

при условии $a + r_1 > r_2$; $|a - r_1| < r_2$, т. е. пучки еще полностью не перекрылись,

$$S_2(z) = \frac{\pi}{2} (r_1^2 + r_2^2) - \frac{1}{2} \sqrt{4a^2 r_2^2 - (r_2^2 - r_1^2 + a^2)} - \quad (2.10)$$

$$-r_1^2 \arcsin \frac{a^2+r_1^2-r_2^2}{2ar_1} - r_2^2 \arcsin \frac{a^2+r_2^2-r_1^2}{2ar_2};$$

если $a + r_1 \leq r_2$, то

$$S_2(z) = \pi r_1^2; \quad (2.11)$$

если $a + r_2 \leq r_1$, то

$$S_2(z) = \pi r_2^2; \quad (2.12)$$

в случае выхода пучка из поля зрения выполняются условия $a + r_1 > r_2$ и $|a - r_1| \geq r_2$, при которых

$$S_2(z) = 0. \quad (2.13)$$

Если разбить всю площадь $S_2(z)$ на элементарные площадки, то для каждой такой площадки существует определенная часть площади приемной оптической системы, формирующая поток, проходящий через диафрагму, что отмечалось выше. Сумма всех этих потоков определяет мощность принимаемого от рассеивающего слоя излучения. Точный расчет потока, осуществляемый по методу элементарных отображений, довольно сложен. Вычисление упрощается, если учесть, что в случае отсутствия виньетирования в оптической системе и одинаковой силе излучения каждого элементарного рассеивающего объема можно всю площадь S_2 заменить точечным источником, совпадающим с центром светимости (яркости) этой площади. Все лучи, идущие от этого источника под углами к оптической оси приемной системы, меньшими или равными $\vartheta_0/2$, образуют конус. Основание конуса лежит в плоскости приемной апертуры. Область перекрытия основания конуса и приемного объектива определяет искомую эффективную площадь $S_1(z)$.

Для расчета этой площади необходимо знать расстояние центра светимости x_c площади $S_2(z)$ от оси z , которое вычисляется по формуле

$$x_c = \left| \iint_{D_2(z)} x d\sigma / S_2(z) \right|, \quad (2.14)$$

где

$$\iint_{D_2(z)} x d\sigma = \frac{r_2^2 - r_1^2 - a^2}{4a} \sqrt{4a^2 r_2^2 - (r_2^2 - r_1^2 + a^2)^2} + \frac{\pi r_1^2 a}{2} - a r_1^2 \arcsin \frac{r_1^2 + a^2 - r_2^2}{2r_1 a} \quad (2.15)$$

при условии $a + r_1 > r_2$ и $|a - r_1| < r_2$.

Если $a + r_2 \leq r_1$, или $a + r_1 \leq r_2$, то $x_c = a$.

Зная x_c , можем рассчитать $S_1(z)$, заменив a на x_c , а процесс расчета подобен вышеизложенному вычислению $S_2(z)$. Поэтому сразу запишем окончательные выражения:

при $|x_c - r_3| < r_4$, $x_c + r_3 > r_4$

$$S_1(z) = \frac{\pi}{2} (r_3^2 + r_4^2) - \frac{1}{2} \sqrt{4x_c^2 r_4^2 - (r_4^2 - r_3^2 + x_c^2)} - r_3^2 \arcsin \frac{x_c^2 + r_3^2 - r_4^2}{2x_c r_3} - r_4^2 \arcsin \frac{x_c^2 + r_4^2 - r_3^2}{2x_c r_4}; \quad (2.16)$$

если $x_c + r_4 \leq r_3$, то

$$S_1(z) = \pi r_4^2; \quad (2.17)$$

в случае, когда $x_c + r_3 \leq r_4$, имеем

$$S_1(z) = \pi d_2^2 / 4. \quad (2.18)$$

Здесь $r_3 = d_2/2$, $r_4 = z \operatorname{tg}(\vartheta_0/2)$.

Таким образом, получены довольно простые формулы, позволяющие произвести расчет регистрируемых рассеянных потоков для любых моментов времени при работе лидара с разнесенными оптическими системами. В случае значительной базы, когда угол ϕ велик, и нельзя пренебречь наклоном пучка к оси z , в формулы легко вводятся определенные уточнения.

2.3 Выбор элементной базы прибора контроля высоты нижней границы облачности

2.3.1 Излучатель

Первая задача исследования состояла в выборе лазерного источника излучения для последующего расчёта параметров коллимирующей оптики.

Необходимыми для данных оценок параметрами являются расходимость лазерного излучения, диаметр выходного пучка и мощность.

Как было показано ранее, наиболее часто на практике для построения лидарных систем контроля высоты нижней границы облачности применяются лазерные диоды с центральной длиной волны генерации вблизи 900 нм, попадающие в спектральное окно прозрачности атмосферы. По этой причине в качестве излучателя было принято решение использовать лазерный диод с техническими характеристиками, приведёнными в таблице 2.1:

Таблица 2.1 - Характеристики лазерного диода SPL LL90_3

Параметр	Единица измерения	Значение
Центральная длина волны	нм	905
Пиковая импульсная мощность	Вт	70
Длительность импульса	нс	40
Размер апертуры	мкм × мкм	200 × 10

На рисунке 2.6 представлен внешний вид выбранного для построения системы лазерного диода.

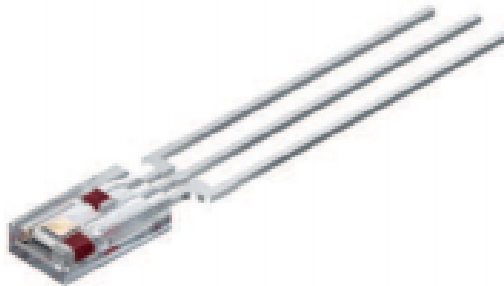


Рисунок 2.6 – Лазерный диод SPL LL90_3

На рисунках 2.7, 2.8 представлена расходимость выходного излучения относительно осей кристалла лазерного диода,

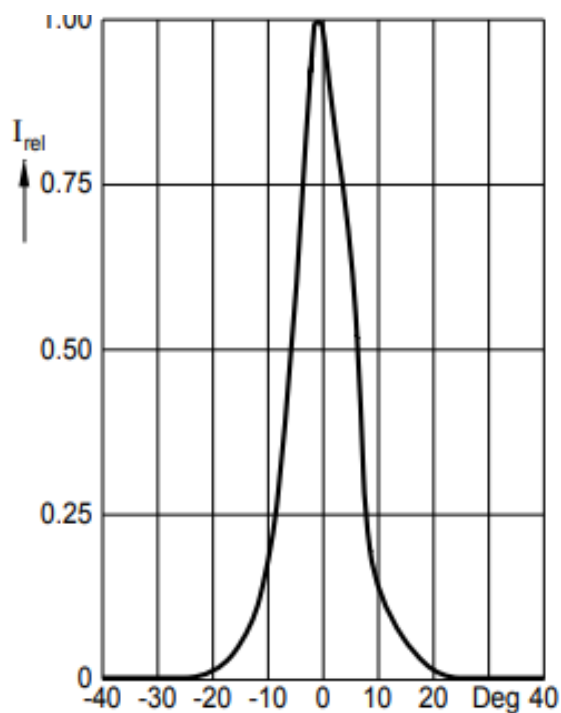


Рисунок 2.7 – Расходимость излучения параллельно «медленной» лазерного диода

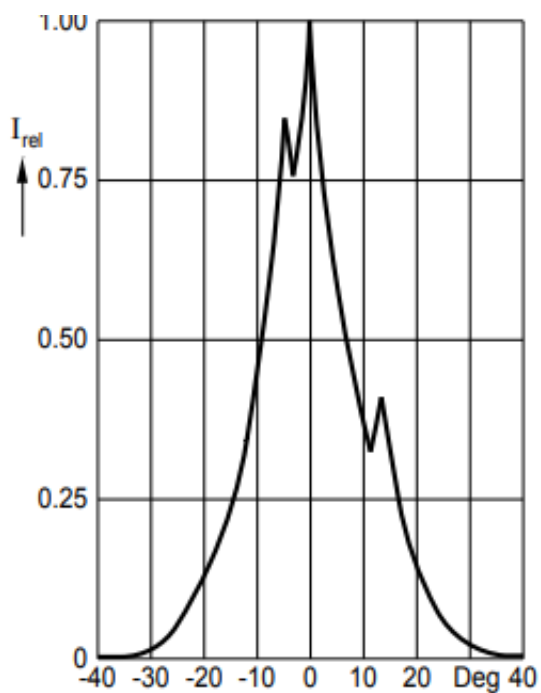


Рисунок 2.8 – Расходимость излучения перпендикулярно «быстрой» оси лазерного диода

Угол расходимости излучения данного лазерного диода по полуширине на полувысоте составляет 15° и 30° , соответственно.

Вычислим числовую апертуру по формуле:

$$NA_{laser} = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2.19)$$

где θ - расходимость излучателя

$$NA_{laser} = \sin(15^\circ) = 0.265$$

Следовательно, числовая апертура линзы для излучателя должна быть не менее 0,265.

По данным приведенным в таблице 2.2 и информации о требованиях к приборам с использованием методики, предложенной выше в этой главе, можно произвести расчёт оптической схемы прибора.

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчёта

Параметр	Значение	Единица измерения
Расходимость лазера	15	°
Радиус излучающего телескопа		
Коэффициент увеличения излучающего телескопа	500	-
Радиус входного зрачка	0,05	м
Расстояние между оптическими осями	0,32	м
Полный перехват сигнала	200	м
Расходимость излучателя	0,52	мрад
Половинный угол	0,26	мрад
Расстояние между излучателем и приёмником	220	мм

Рисунок 2.9 отображает размеры изображения в фокальной плоскости приёмника в зависимости от дальности до зондируемого объёма.

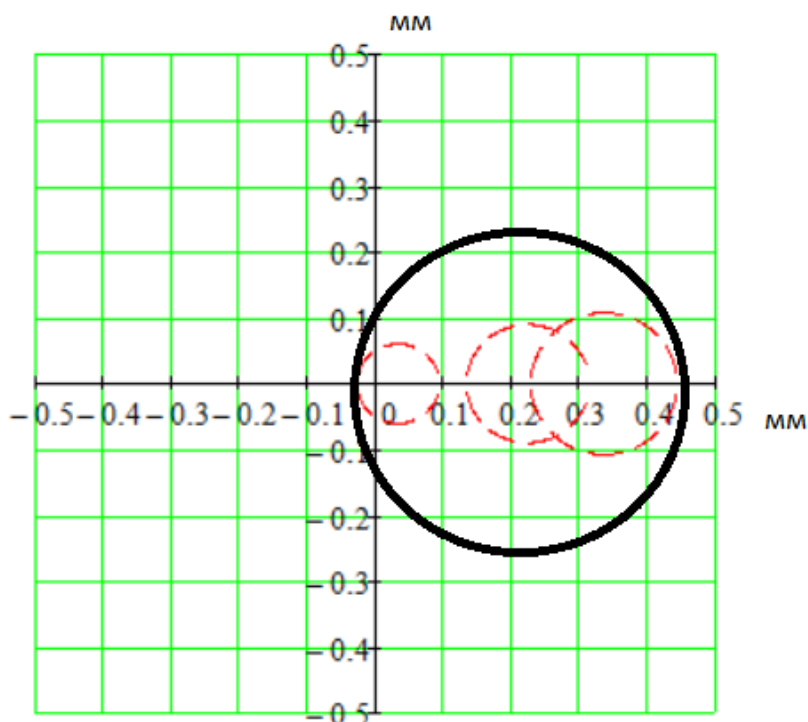


Рисунок 2.9 – Границы изображения в фокальной плоскости приёмной линзы в зависимости от дальности до зондируемого объёма (пунктир 2000 м, 300м, 100 м, широкая линия – полевая диафрагма)

На основании проведенных расчётов можно определить, что полевая диафрагма должна быть не менее 0,5 мм в диаметре и смещена от оптической оси линзы приёмной части на 0,2 мм.

Как будет показано далее, полевая диафрагма может быть совмещена с площадкой фотодетектора.

2.3.2 Детектор

В качестве детектора был выбран лавинный фотодиод серии С30902ЕН, фирмы Excelitas. Это кремниевый лавинный фотодиод, использующий двухдиффузионную структуру с эффектом прокола базы. Данная структура обеспечивает высокую чувствительность в спектральном диапазоне от 400 до 1000 нм, а также быстрое время спада и нарастания. Чувствительность фотодиода не зависит от частоты модуляции вплоть до 800 МГц. Фотодиоды герметично запаены в корпус ТО-18 с плоским стеклянным окном, что обеспечивает соответствующую стабильность функционирования и возможность их применения в полевых

условиях. Основные технические характеристики лавинного фотодиода С30902ЕН, Фирма Excelitas приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Основные характеристики лавинного фотодиода С30902ЕН

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон (нм)	400-1100
Активная зона (мм)	0.5 мм
Тип корпуса	ТО-18, ТО-66
Активный материал	Кремний
Тип фотоприемника	Лавинный
Оптимизация под длину волны (нм)	830, 900
Чувствительность ($\lambda=830$ нм) (А/Вт)	77
Время нарастания/спада (10-90%) (нс)	0.5 - 0.75
Ёмкость (пФ)	1.6 - 2.0
Квантовая эффективность (830 нм) (%)	77
Темновой ток (нА)	15 - 30
Напряжение пробоя (В)	225
Коэффициент усиления	150
Рабочий диапазон температур	-40 .. +70 °С

Рисунок 2.10 показывает зависимость чувствительности лавинного фотодиода С30902ЕН от длины волны излучения. Пунктиром представлены характеристики для варианта лавинного фотодиода со встроенным оптическим фильтром.

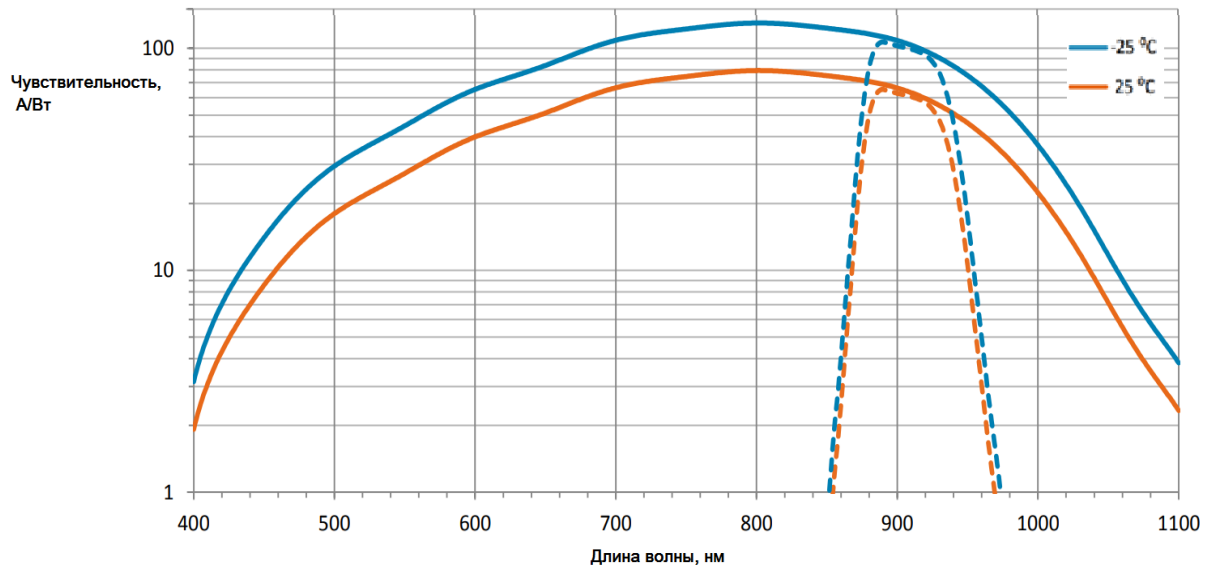


Рисунок 2.10 – Зависимость чувствительности лавинного фотодиода С30902ЕН от длины волны падающего на него излучения

На рисунке 2.11 приведены варианты корпусов С30902ЕН.

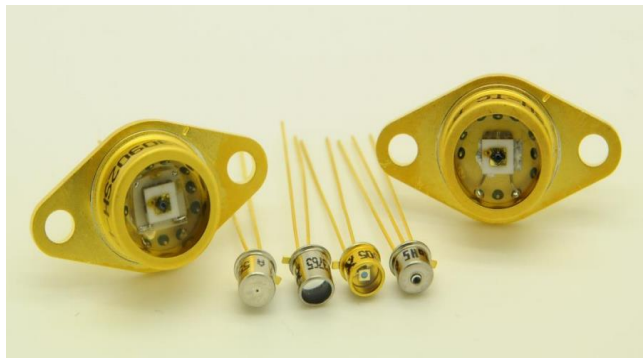


Рисунок 2.11 – Внешний вид лавинного фотодиода С30902ЕН

Так как диаметр активной зоны лавинного фотодиода составляет 0,5 мм, то она и будет являться полевой диафрагмой. Согласно произведённым расчетам, был изготовлен макет прибора контроля высоты нижней границы облачности с характеристиками, приведенными в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Технические характеристики макета прибора контроля высоты нижней границы облачности

Диапазон высоты	0 ... 3 км
Пространственное разрешение	15 м
Временное разрешение	2 ... 10000 с, по выбору (по умолчанию 57 с)
Коэффициент пропускания объектива	Типичный 96 %
Коэффициент пропускания окон	Типичный 97 % в чистом состоянии
Детектор	Кремниевый лавинный фотодиод
Диаметр поверхности	0,5 мм
Полоса пропускания приемника	3 МГц
Центральная длина волны интерференционного фильтра	Типичная центральная волна 915 нм
Полоса пропускания фильтра	25 нм
Лазер	Лазерный диод на арсениде индия и галлия (InGaAs)
Режим работы	Импульсный
Номинальные свойства импульса:	
Пиковая мощность	Типичная 70 Вт
Длительность импульса	Типичная 35 нс
Частота следования импульсов	10 кГц
Классификация лазера	лазерное устройство класса 1М согласно ГОСТ Р МЭК 60825-1-2009
Вес	13,5 кг
Габариты	590×340×168 мм

На рисунке 2.12 представлен схематически изображенный вид сигнала от облака. Здесь R – расстояние до лидара, U – уровень сигнала от облака, 1, 2 и 3 – характерные точки на сигнале. Как отмечалось ранее, при интерпретации данных

лидарного зондирования облачности возникают трудности, связанные с неопределенностью понятия «нижняя граница облаков».

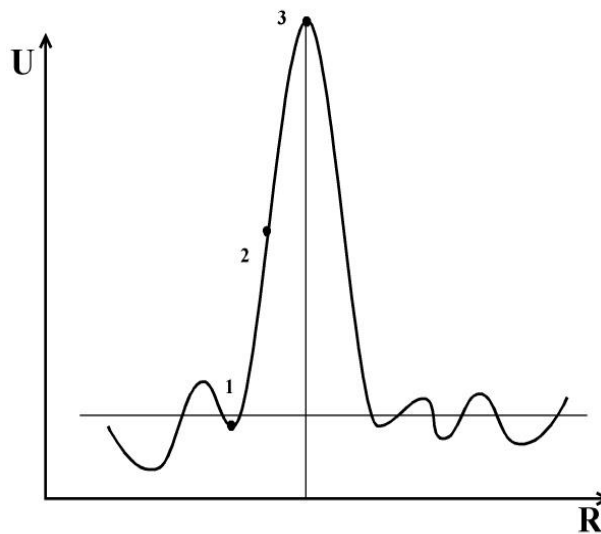


Рисунок 2.12 – Схематическое изображение сигнала от облака

Проще всего считать границей облачности точку 1, где производная от сигнала первый раз меняет знак. Однако в реальных условиях, когда сигнал сильно зашумлен, этот способ малоэффективен. Кроме того, вследствие высокой чувствительности лидарной системы, она может регистрировать подоблачный слой, где находятся оптически активные частицы, и выдавать заниженные значения высоты облаков. Точка 2 расположена на половинном уровне максимума сигнала (точка 3) и близка к точке перегиба, в которой меняет знак вторая производная. Однако в условиях «рыхлых» облаков эта точка может располагаться глубоко внутри облачности, а облакомером, соответственно, будут выдаваться завышенные значения.

Можно решать уравнение лазерного зондирования, представленное в приближении однократного рассеяния [74], любым известным способом, например, методом Ковалева, и уже из него извлекать информацию о высоте облачности. Методические вопросы, связанные с данным подходом, подробно освещены в литературе [51], [32, 49].

Как видно, выбор однозначного критерия определения нижней границы облачности является сложной задачей, решение которой зависит от множества

факторов. В результате проведения предварительной аналитической работы был выбран следующий вариант обработки поступающей информации:

- Определяется дисперсия лидарного сигнала вместе с шумом в дальней зоне, где отсутствует отраженный от облака сигнал;
- В приближении однократного рассеяния при допущении постоянства индикатрисы рассеяния по трассе зондирования рассчитывается пороговый уровень, при превышении которого на данной дальности объект зондирования классифицируется как облако;
- Определяется максимальная скорость возрастания сигнала от облака (максимальная производная);
- Определяется точка максимума, где производная равна нулю (точка 3 на рисунке);
- В зависимости от значения максимальной производной осуществляется расчет плотности облака, и определяется опережающее смещение от верхней точки сигнала от облака;
- Данная точка принимается за нижнюю границу облачного слоя.

Как показали испытания, проведенные совместно с регистратором высоты облачности РВО-2, данный алгоритм наиболее точно определяет пространственное расположение нижней границы облачности, при этом разница в показаниях приборов не превышает 15 метров. Определение высоты нижней границы облачности, проведенное на основе других методов, дает значительно большую погрешность.

Кроме того, исследования, проводимые с накоплением статистических данных, позволяют зондировать несколько слоев облачности. Это связано с тем, что в процессе зондирования облака перемещаются вследствие ветрового переноса, при этом в облаках нижнего яруса могут быть свободные от облачности области, через которые наблюдаются верхние слои облаков. Пример такого сигнала представлен на рисунке 2.13.

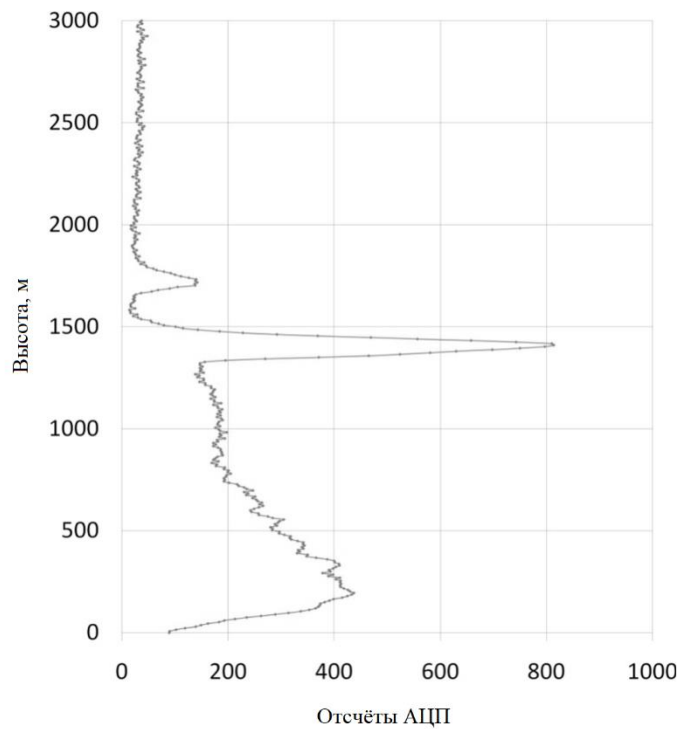
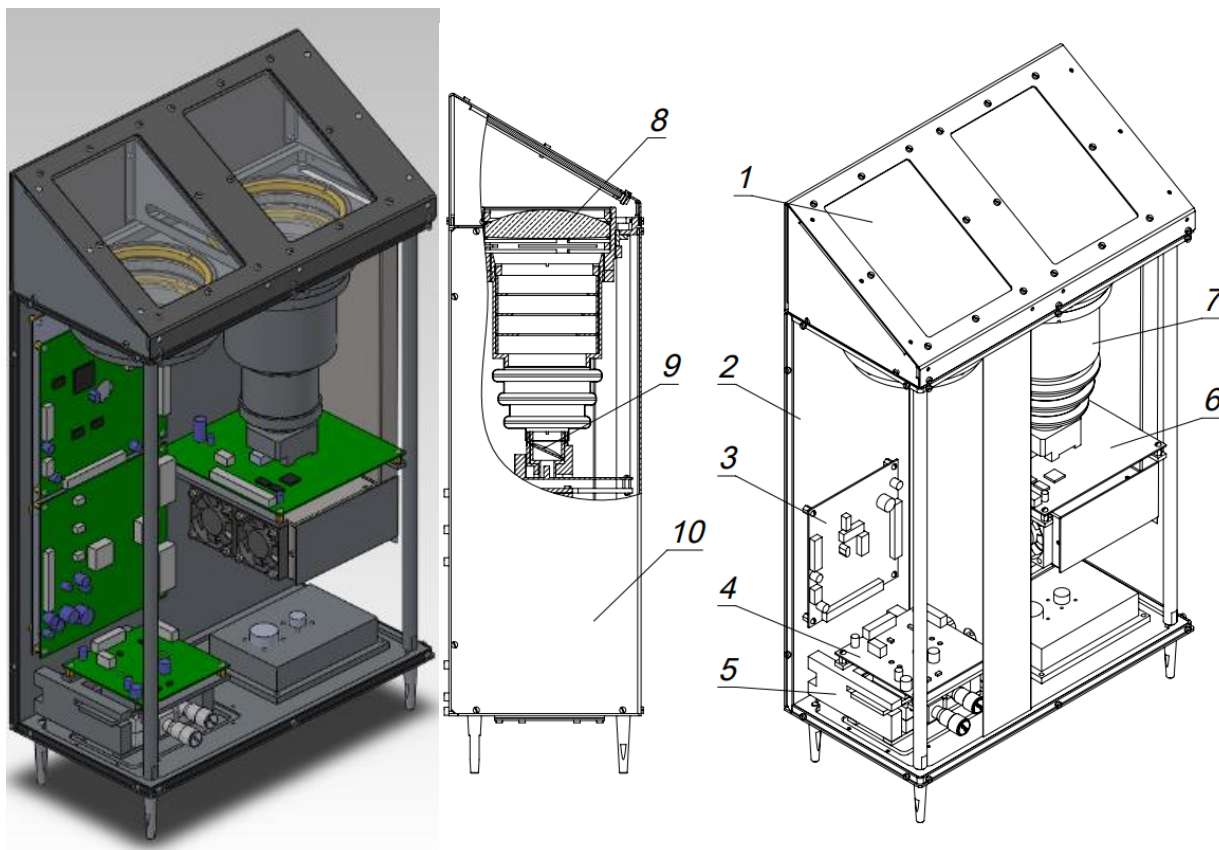


Рисунок 2.13 – Лидарный сигнал, полученный от 2-х слоев облачности

На основании вышесказанного можно отметить, что полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале прибора контроля высоты нижней границы облачности, а сравнение полученных данных с показаниями серийно выпускаемых приборов – о надежности получаемых результатов.

2.4 Конструкция разработанного прибора

На основе результатов математического моделирования функции перекрытия прибора, с учётом параметров, подобранных излучателя и приёмника была разработана трёхмерная модель прибора контроля высоты нижней границы облачности. На рисунках 2.15, 2.16 показан общий вид конструкции макета прибора контроля высоты нижней границы облачности и расположения его основных элементов.



1 – защитное окно, 2 – корпус, 3 – плата процессора, 4 – плата управления излучателем, 5 – юстировочный столик, 6 – плата оцифровки сигналов фотоприемника, 7 – конус для защиты приёмного тракта от паразитной засветки внутри прибора, 8 – линза, 9 – интерференционный фильтр, 10 – крышка

Рисунок 2.15 – Трёхмерная модель, общий вид и расположение элементов в конструкции прибора контроля высоты нижней границы облачности

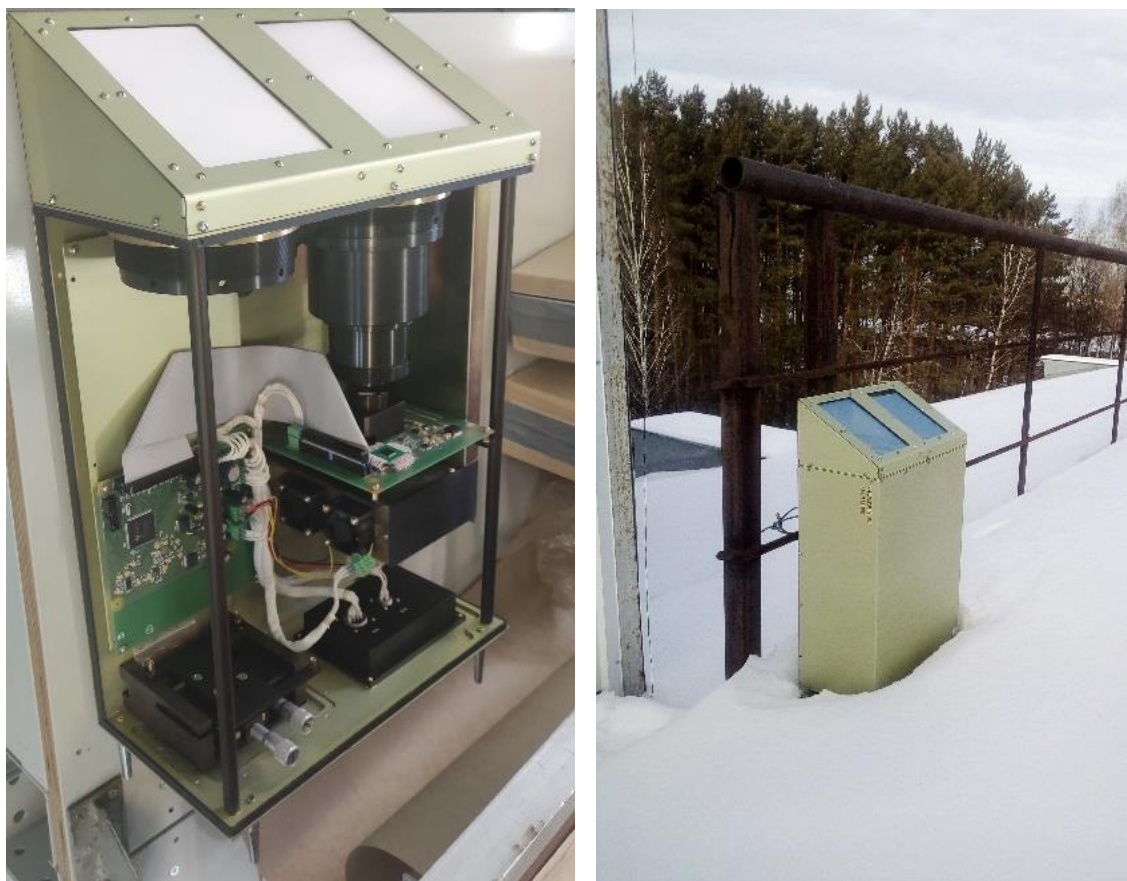


Рисунок 2.16 – Общий вид прибора контроля высоты нижней границы облачности:

со снятой крышкой (слева) и на крыше ИОА СО РАН при приёмо-сдаточных испытаниях образца (справа)

Подробнее информация о технических характеристиках макета прибора контроля высоты нижней границы облачности приведена выше в таблице 2.4.

2.5 Юстировка прибора контроля высоты нижней границы облачности

При изготовлении и настройке оптоэлектронных приборов особое место занимает процедура юстировки. Так как от точности размещения оптических элементов относительно друг друга зависит работа всего прибора. Традиционной методикой для юстировки лидаров и приборов, работающих на подобных принципах, является юстировка при помощи параллельного пучка.

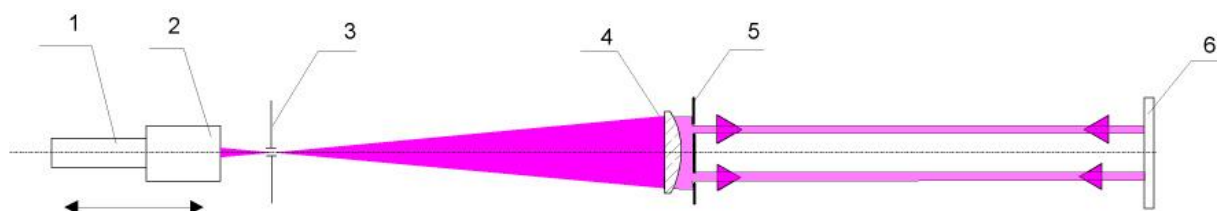
Формирование оптического пучка с плоским волновым фронтом возможно двумя выработанными в процессе исследования методами.

Метод 1:

Необходимо следующее оборудование и инструменты:

- Столик для юстировки - 1 шт.;
- Лазер He-Ne (или полупроводниковый с рабочей длиной волны 630 нм) с источником питания;
- Оптический стол с размерами рабочей поверхности не менее 1х1 м - 2 шт.;
- Телескоп с асферической линзой диаметром не менее 150 мм и фокусным расстоянием 1500 мм;
- Микрообъектив WF10X - 1 шт.;
- Зеркало с наружным напылением диаметром не менее 200 мм - 1 шт.;
- Маска из черной бумаги - 1 шт.;
- Приспособление для фиксации лазера на столике для юстировки;
- Диафрагмы 1,0 мм - 1 шт.;
- Пятикратная лупа 5х - 1 шт.

Расположение элементов для создания плоского волнового фронта представлено на рисунке 2.17.



- 1 - лазер, 2 - микрообъектив, 3 - диафрагма 0,5 мм, 4 - линза телескопа,
5 - маска, 6 - отражательное зеркало

Рисунок 2.17 – Схема прохождения лучей при формировании плоского фронта с помощью зеркала

Отражательное зеркало располагается на расстоянии 3-4 м от телескопа строго перпендикулярно падающему на него пучку лучей. На него направляется пучок лучей от телескопа, на выходе которого располагается маска из плотной черной бумаги. По краям области прохождения луча прорезаны 4 квадратных отверстия размером 5х5 мм. Путем использования юстировочных элементов на зеркале 6 и микрообъективе 2 необходимо, чтобы отраженные от зеркала лучи

попадали в те же отверстия, откуда были испущены. При этом поперечный размер попадающих на маску отраженных лучей не должен отличаться от размера отверстия более, чем на 0,5 мм.

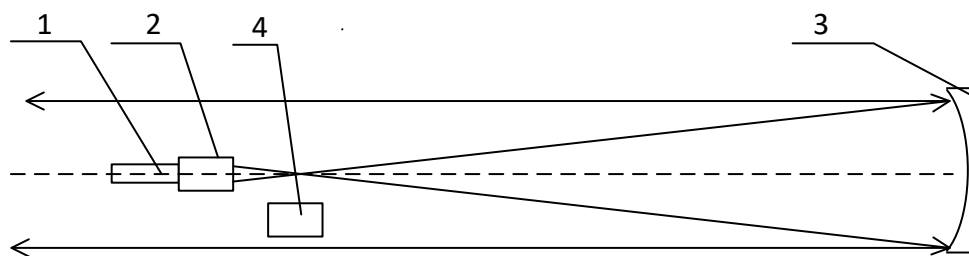
После выполнения этих операций процесс формирования оптического пучка с плоским волновым фронтом считается законченным.

Метод 2:

Необходимо следующее оборудование и инструменты:

- Столик для юстировки - 1 шт.;
- Лазер He-Ne (или полупроводниковый с рабочей длиной волны 630 нм) с источником питания;
- Зеркальный коллиматор с диаметром 400 мм и фокусным расстоянием 3000 мм;
- Микрообъектив - 1 шт.;
- Приспособление для фиксации лазера для юстировки;
- Интерферометр сдвига.

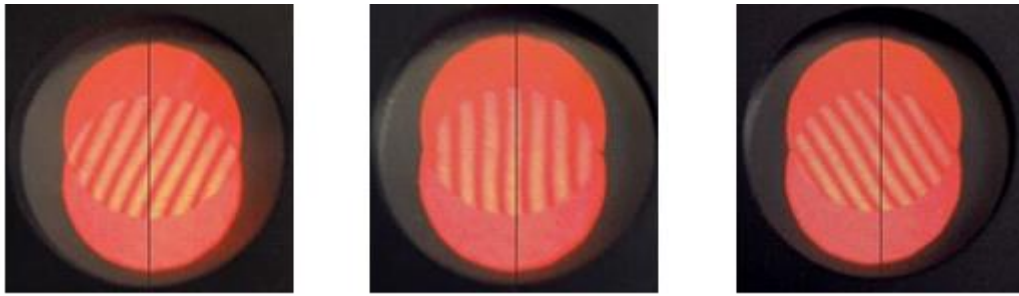
Расположение элементов для создания плоского волнового фронта представлено на рисунке 2.18.



1 - лазер, 2 - микрообъектив, 3 - зеркало, 4 - интерферометр сдвига

Рисунок 2.18 – Схема прохождения лучей при формировании плоского фронта с помощью зеркала

Путем использования юстировочных элементов на микрообъективе 2 необходимо добиться, чтобы отраженные лучи от зеркала давали на интерферометре картину, как на рисунке 2.19.

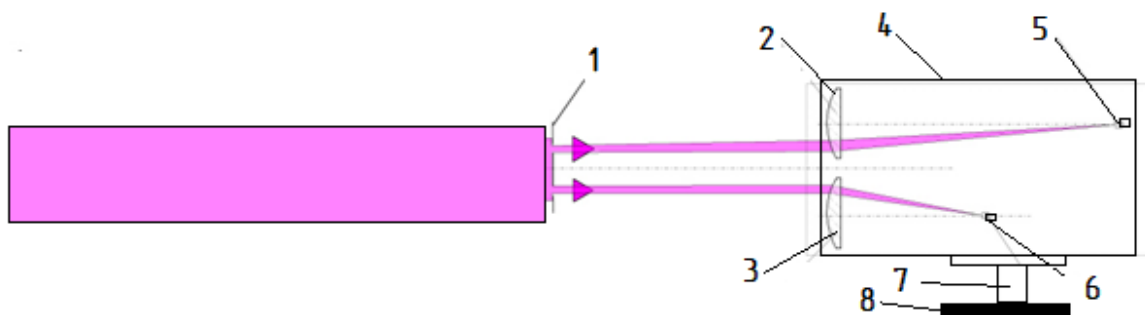


а – сходящийся б – коллимированный в – расходящийся

Рисунок 2.19 – Изображения пучка на интерферометре сдвига

После выполнения этих операций процесс формирования оптического пучка с плоским волновым фронтом считается законченным.

Для проведения настройки на пути оптического пучка с плоским волновым фронтом от источника 1 ставится оптический стол 8, на котором располагается юстировочный столик 7 с возможностью линейных перемещений с точностью 0,01 мм. При этом изделие располагается на площадке юстировочного столика 7 и закрепляется на нем на расстоянии не менее 1 м от телескопа так, чтобы световой пучок от источника 1 примерно поровну распределялся между приемной и излучающей апертурами как показано на рисунке 2.20.



1 - источник оптического пучка с плоским волновым фронтом,

2 - линза излучателя, 3 - линза фотоприемника, 4 - корпус, 5 - излучатель (полупроводниковый лазер), 6 - лавинный фотодиод, 7 - юстировочный столик с 4-мя степенями свободы (3 линейные взаимно перпендикулярные перемещения и одна угловая с вращением вокруг вертикальной оси), 8 - поверхность оптического стола

Рисунок 2.20 – Оптическая схема настройки прибора контроля высоты нижней границы облачности

Используя элементы только юстировочного столика 7, располагают прибор контроля высоты нижней границы облачности, таким образом, чтобы фокус светового пучка попадал на приемную поверхность лавинного фотодиода 8. Эта поверхность видна как темный квадрат размерами 500 x 500 мкм. Для наблюдения попадания пучка на поверхность фотоприемника лучше применять лупу с коэффициентом увеличения не менее 5х.

После завершения оптической настройки фотоприемника можно приступать к настройке излучателя. Для этого, не меняя положения прибора относительно всех элементов настройки, с помощью юстировочного столика, расположенного в корпусе под платой излучателя, положение излучателя таким образом настраивается, чтобы вторая часть сфокусированного лазерного пучка попадала точно на излучающую область. Излучающая поверхность видна как тонкий штрих размерами 10x200 мкм на корпусе излучателя, поэтому наблюдать ее и попадание фокуса пучка в нужную область лучше с помощью лупы 5х.

На этом юстировка прибора завершена и для дальнейшей работы необходимо затянуть все фиксирующие винты, сохраняя неизменным достигнутое взаимное расположение всех деталей и узлов.

2.6 Калибровка прибора контроля высоты нижней границы облачности

Прибор контроля высоты нижней границы облачности, как и все приборы являющиеся средствами измерений, нуждается в калибровке. Калибровка средств измерений - совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [75].

Для проверки функционирования прибора контроля высоты нижней границы облачности и проведения калибровки в полевых условиях эксплуатации был разработан поверочный комплект прибора контроля высоты нижней границы облачности. К поверочному комплекту предъявляются следующие требования: возможность использования в полевых условиях, компактность, минимальные требования к дополнительному оборудованию, и персоналу.

Поверочный комплект работает следующим образом, сверху на прибор контроля высоты нижней границы облачности устанавливается поверочный

комплект, закрепляется на нём, чтобы совместить оптические оси, и исключить нежелательную засветку напрямую от излучателя в приёмник [76].

Прибор контроля высоты нижней границы облачности включается в штатном режиме. Свет от излучателя попадает в коллиматор, который фокусирует его на торце оптоволоконного разъёма, к которому подключается оптоволоконная линия задержки, затем пройдя через оптоволоконный разъём, излученный импульс света проходит ещё один коллиматор и попадает на вход приёмной части и в конечном итоге на чувствительную площадку прибора контроля высоты нижней границы облачности [76].

Структурная схема поверочного комплекта прибора контроля высоты нижней границы облачности приведена на рисунке 2.21.

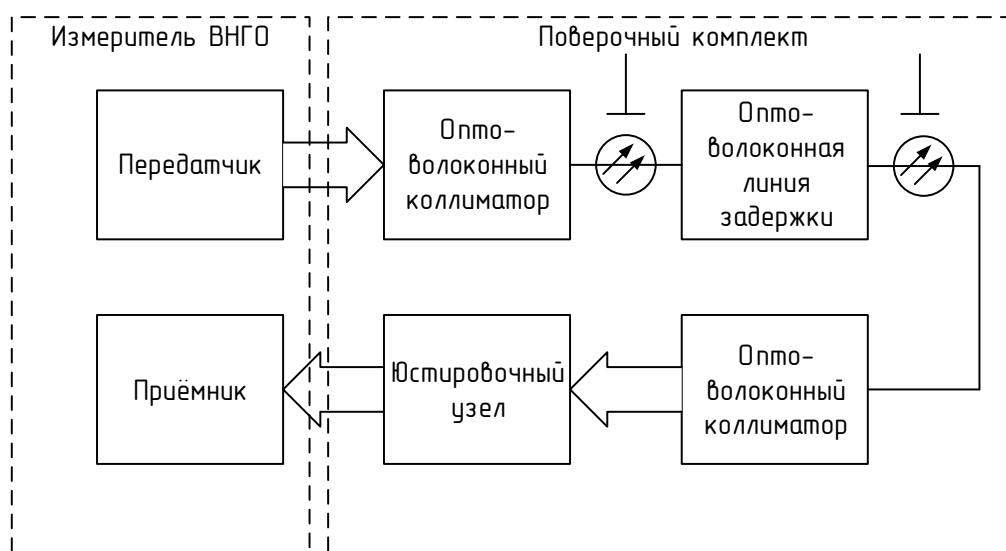


Рисунок 2.21 – Структура поверочного комплекта для прибора контроля высоты нижней границы облачности

Использование коллиматора на входе необходимо чтобы собрать большую часть сигнала, хотя диаметр коллиматора существенно меньше чистой апертуры прибора, в то же время он значительно больше, чем диаметр сердцевины волокна. Коллиматор же на выходе не только расширяет пучок, но и делает его параллельным (в отличии от пучка, выходящего напрямую из оптического волокна с расходимостью около 25°), что является необходимым для его пропускания через приёмную линзу прибора. Параллельность пучка на входе в приёмную часть, является необходимым, но не достаточным условием, для попадания в

фотоприёмник, он должен совпадать с оптической осью приёмной части. Для настройки положения пучка в поверочном комплекте предусмотрен узел для юстировки наклона коллиматора в двух плоскостях. Настройка совмещения оптических осей осуществляется при изготовлении поверочного комплекта для прибора, при этом для простоты настройки используется маломощный излучатель видимого света с возможностью подключения к оптоволокну через разъём [76].

Рисунок 2.22 показывает состав поверочного комплекта прибора контроля высоты нижней границы облачности, а рисунок 2.23 внешний вид и упаковку для поверочного комплекта прибора контроля высоты нижней границы облачности.



Рисунок 2.22 – Состав поверочного комплекта



Рисунок 2.23 – Внешний вид и упаковка поверочного комплекта

Поверка или калибровка по предложенному методу позволяет осуществлять её в широком диапазоне дальностей (от нескольких метров до десятков километров) без особых затруднений. Также требования к персоналу и его квалификации существенно ниже, чем у других методик, при этом прибор контроля высоты нижней границы облачности может оставаться на месте своей эксплуатации. Применение современных оптоволоконных технологий позволяет легко осуществить имитацию нескольких слоёв облачности (использовав несколько линий задержки и ослабитель между ними), что практически невозможно осуществить другими методами [76].

Основным источником погрешности в данном случае является изменение коэффициента преломления волокна и его линейных размеров от состояния окружающей среды. Однако погрешность представленного подхода существенно меньше метрологических требований к приборам контроля высоты нижней границы облачности.

2.7 Выводы

В ходе решения задач диссертации был разработан прибор контроля высоты нижней границы облачности построенный по биаксиальной оптической схеме, с импульсной мощностью лазерного диода на уровне 70 Вт, длительностью импульса 35 нс, с центральной длиной волны близ 905 нм, который позволяет определять высоту нижней границы облачности в диапазоне высот от 15-100 м с погрешностью ± 10 м и в диапазоне 100-2000 м с погрешностью ± 10 % при отношении сигнал/шум больше 10.

Оценивая технические характеристики предложенного решения по сравнению с другими известными решениями, приведенными в приложении А, можно отметить, что разработанный прибор контроля высоты нижней границы облачности:

- по массе меньше представленных аналогов в среднем в $\sim 3,2$ раза (разница составила от 14% до 695%);
- объём, занимаемый габаритами прибора, меньше представленных аналогов в среднем в $\sim 5,6$ раза (разница составила от 27% до 1595%);
- имеет эксплуатационные характеристики не хуже приведенных аналогов (степень защиты IP 65, класс безопасности используемого лазера).

Разработан способ калибровки прибора контроля высоты нижней границы облачности, заключающийся в том, что при помощи оптоволоконной линии задержки сигнал передаётся с излучателя на приёмную часть, через промежуток времени, равный времени задержки в подключенной линии задержки, что позволяет проводить одновременно проверку функционирования регистрирующей и оптической части прибора в полевых условиях.

Разработана конструкция калибровочного устройства прибора контроля высоты нижней границы облачности при помощи оптоволоконной линии задержки.

3 УСТРОЙСТВО СНИЖЕНИЯ ФОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЛИДАРНЫХ СИГНАЛАХ

3.1 Фоновое излучение

Наряду с полезным сигналом на фотоприемник попадает также фоновое излучение. Оно обусловлено оптическим излучением, существующим в атмосфере в полосе приемника (например, излучение Солнца, луны, звездного неба). Мощность фонового излучения записывается следующим образом

$$P_{\phi} = B(\lambda)A_0\Delta\lambda_{\phi}\Omega, \quad (3.1)$$

где $B(\lambda)$ - яркость фона; A_0 - площадь приемной оптической антенны; $\Omega = \frac{(\pi d_{\phi}^2)}{4} F^2$ - телесный угол поля зрения приемной системы; d_{ϕ} - диаметр пятна, сфокусированного на детектор, F - фокусное расстояние.

На рисунке 3.1 приведены типичные спектры яркости дневного безоблачного и облачного неба.

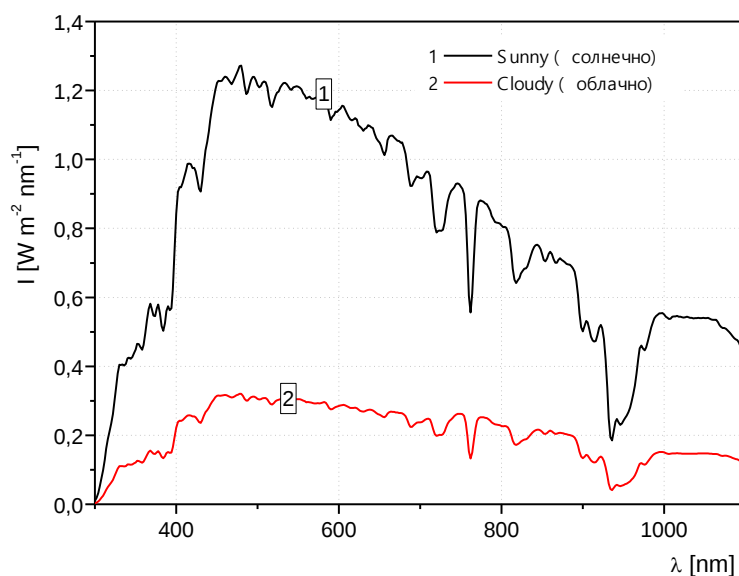


Рисунок 3.1 – Типичные спектры яркости дневного неба: 1) спектр яркости дневного безоблачного неба; 2) спектр яркости дневного облачного неба

На рисунке 3.2 приведены спектры яркости ночного неба с Луной и без Луны.

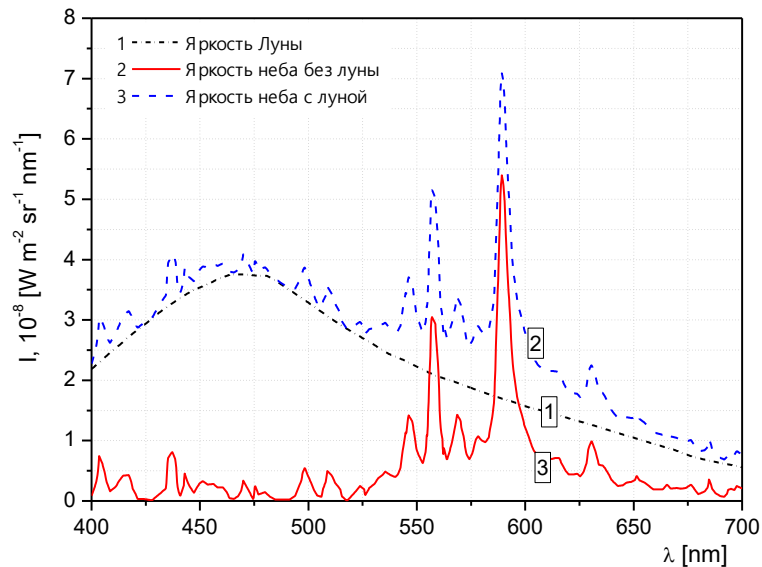


Рисунок 3.2 – Типичные спектры яркости ночного неба: 1) спектр яркости Луны; 2) спектр яркости ночного неба без Луны; 3) спектр яркости ночного неба с Луной

Приближенно, яркость дневного безоблачного неба также можно рассчитать, зная спектральную плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы по следующей формуле:

$$B(\lambda) = \mu I_0(\lambda) \frac{\cos \psi}{\pi}, \quad (3.2)$$

где $I(\lambda)$ - плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы; ψ - зенитное расстояние Солнца; μ - коэффициент, характеризующий распределение яркости по небосводу в зависимости от азимута φ , зенитного расстояния Солнца ψ , зенитного расстояния точки наблюдения на небе θ , альбедо A , метеорологической дальности видимости R_M и оптической толщины слоя атмосферы τ_a . Для средних метеоусловий летом $\tau_a = 0,3$; $A = 0,2$; $\psi = 40^\circ$; $\theta = 0^\circ$; $R_M = 20$ км, $\mu = 0,172$; $I_0(0,9) = 0,148$ Вт·см⁻²мкм⁻¹·стер⁻¹. Тогда $B(\lambda) = 8,1 \cdot 10^{-3}$ Вт·см⁻²мкм⁻¹·стер⁻¹, либо $B(\lambda) = 81$ Вт·м⁻²мкм⁻¹·стер⁻¹. Для сравнения интегральная яркость безоблачного неба по спектру, приведенному на рисунке 3.1, который

будет использован для дальнейших расчетов на длине волны 0,9 мкм составляет $\sim 50 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$, а для ночного безлунного неба $\sim 10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$.

3.2 Использование полупроводниковых лазерных диодов в оптоэлектронных приборах

Использование полупроводниковых лазерных диодов в оптоэлектронных приборах, а именно лидарных устройствах сопряжено с определенными трудностями. Рассмотрим подробнее спектральные характеристики лазерного диода SPL LL90_3, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Спектральные характеристики лазерного диода SPL LL90_3

Основная длина волны (мин.)	895 нм
Основная длина волны (тип.)	905 нм
Основная длина волны (макс.)	915 нм
Спектральная ширина на полувысоте	7 нм
Температурный коэффициент изменения длины волны	0,3 нм/°К

Типовое значение коэффициента зависимости изменения длины волны от температуры для мощных лазерных диодов составляет около 0,25-0,33 нм/°К (в зависимости от производителя, а если точнее от размера активного тела и изменения его размеров из-за температуры).

Кроме этого, в документации на серийно производимые лазерные диоды существуют такие понятия как, минимальное, типовое и максимальное значение центральной длины волны при температуре плюс 25° С.

В тоже время для уменьшения дробового шума на фотодетекторе из-за фоновой засветки и возможности увеличить коэффициент усиления приёмного тракта необходимо установить оптический фильтр с как можно меньшей шириной полосы пропускания. Если опираться на типовые значения центра и ширину спектра излучения, то необходимо применять оптический фильтр с центральной длиной волны 905 нм и полосой пропускания шириной 10 нм.

Для проверки этого предположения в одинаковых условиях (протекающий ток, температура) были измерены спектры семи лазерных диодов из одной партии поставки, результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение лазерных диодов SPL LL90_3

№ изделия	Центральная длина волны, нм	Спектральная ширина линии на полувысоте интенсивности, нм
1	903,1	2,80
2	904,0	2,77
3	907,9	11,8
4	900,9	4,64
5	901,4	2,65
6	909,3	3,31
7	904,6	2,69

На рисунке 3.3 показан спектр пропускания интерференционного фильтра «905 nm CWL, 10 nm FWHM», фирмы Edmund Optics.

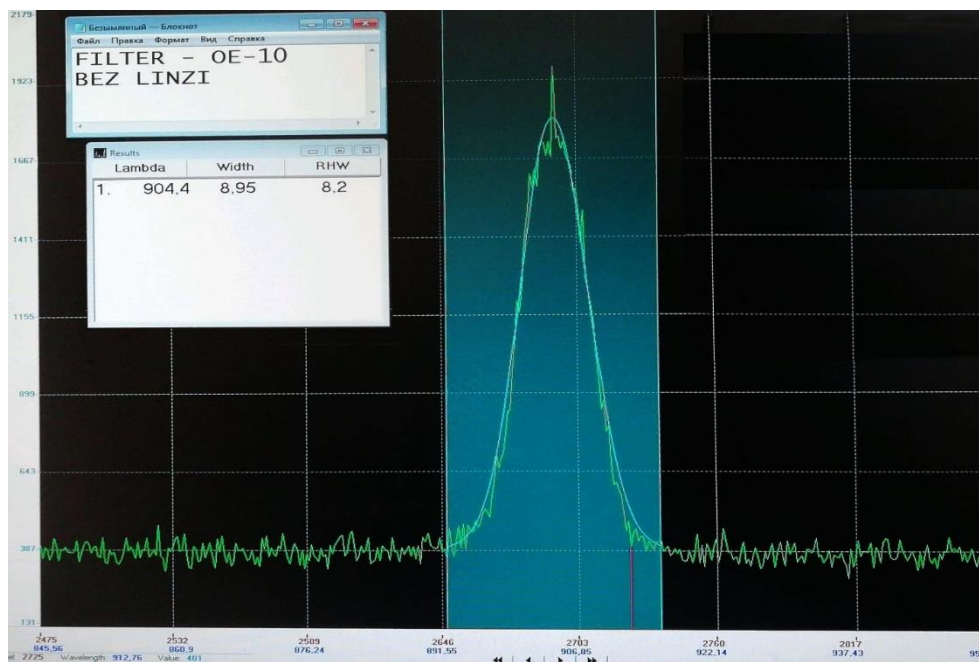


Рисунок 3.3 – Спектр пропускания фильтра «905 nm CWL, 10 nm FWHM»

Из сравнения спектральных характеристик лазера (таблица 3.2) и фильтра (рисунок 3.3) возможна ситуация, при которой центр линии излучения лазера будет расположен на длине волны 900,9 нм, а центр полосы пропускания фильтра – 904,4 нм (рисунок 3.4).

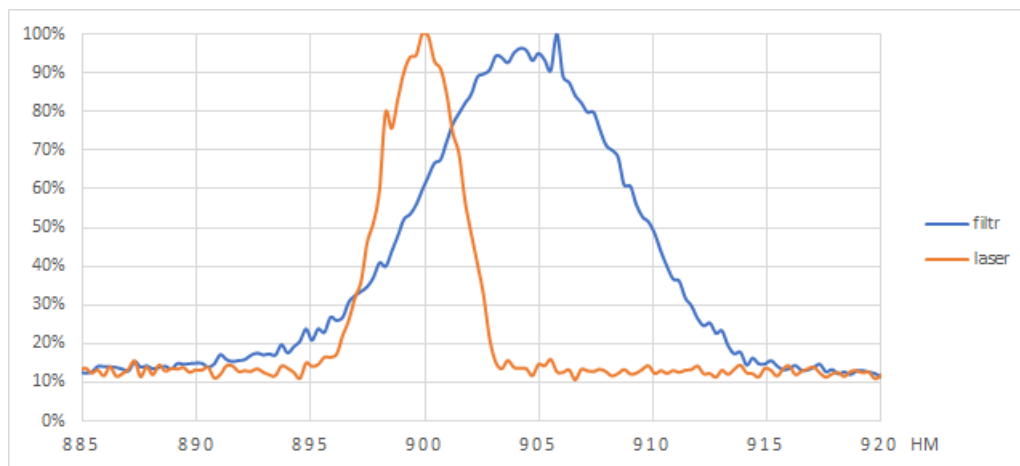


Рисунок 3.4 – Спектры диода SPL LL90_3 и пропускания фильтра «905nm Bandpass Interference Filter FWHM 10 nm» фирмы Edmund Optics

Отсюда следует, что при работе прибора будет использоваться не более 10% приходящего излучения. Поэтому, чтобы можно было использовать лазерные диоды без предварительной выбраковки, нужно использовать фильтр с пропусканием шириной не менее 25 нм.

Чтобы обеспечить работу оптических приборов для определения характеристик атмосферы, необходимо фильтровать фоновую составляющую сигнала. Оптические способы фильтрации фона заключаются в минимизации угла приёма излучения путём установки оптических фильтров и затворов. С фоновым излучением, попавшим на фотодетектор, приходится бороться уже в электронной части.

В электронной части фон может быть отсечён при помощи частотной фильтрации, выборки данных синхронно с импульсным излучателем и другими методами. Однако, если фон превысит динамический диапазон приёмного тракта, то извлечение сигнала из фона не представляется возможным. Для сжатия динамического диапазона сигнала, поступающего на вход усилителей, был

разработан и апробирован способ уменьшения фона в сигнале прибора контроля высоты нижней границы облачности.

3.3 Способ уменьшения фона в сигнале прибора контроля высоты нижней границы облачности

Рассмотрим схему приёмной части лидара приведенную на рисунке 3.5.

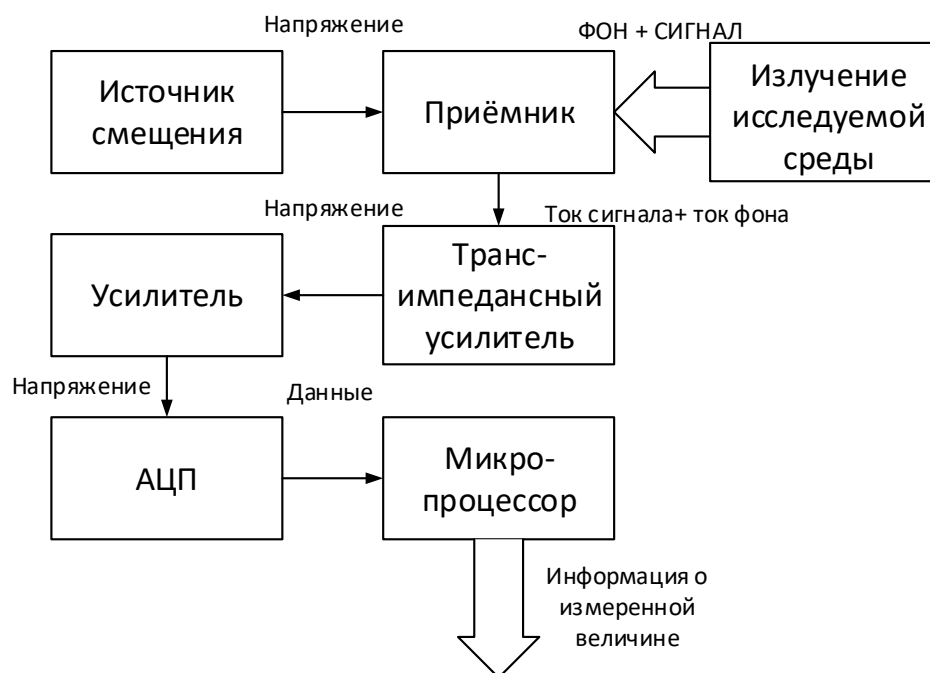


Рисунок 3.5 – Схема приёмной части лидара

В качестве приёмника в данной схеме используется лавинный фотодиод или PIN-диод, который выдаёт ток в зависимости от принятого излучения. Для повышения быстродействия может применяться вспомогательный источник смещения.

Для дальнейшего преобразования сигнала, необходимо преобразовать фототок в напряжение. Именно здесь и находится основное ограничение динамического диапазона. Трансимпедансный усилитель должен обеспечивать динамический диапазон самого сигнала, который, в случае многослойной облачности будет составлять несколько порядков отсчетов АЦП и дополнительно к нему будет добавляется фон. Чтобы минимизировать влияние фона и сократить динамический диапазон сигнала было разработано устройство уменьшения фона.

Использование лазерных диодов требует использования оптических фильтров с широкой полосой пропускания до 25 нм, что влечёт за собой большую импульсную засветку.

Облакомер построен по принципу импульсной лазерной локации: мощный, но короткий по длительности зондирующий импульс света излучается передающей системой и распространяется в направлении трассы зондирования; сигнал, отражённый назад, от слоя облачности, собирается приёмной системой и передаётся на детектор. Сигнал, получаемый на детекторе, содержит смесь из отклика от зондирующего импульса и фонового сигнала, зачастую превышающего полезный сигнал. Устройство с отрицательной обратной связью по фоновому сигналу вычитает сигнал фона из входного сигнала. Процессор, учитывая скорость распространения света, параметры зондирующего импульса и сигнал, полученный с детектора, вычисляет оптические характеристики атмосферы. Схема устроена следующим образом: полученный сигнал оцифровывается, из оцифрованного сигнала выделяется фоновая составляющая, затем сигнал передаётся на управление вычитающего устройства. Структурная схема устройства, реализующего способ вычитания фонового сигнала, показана на рисунке 3.6.

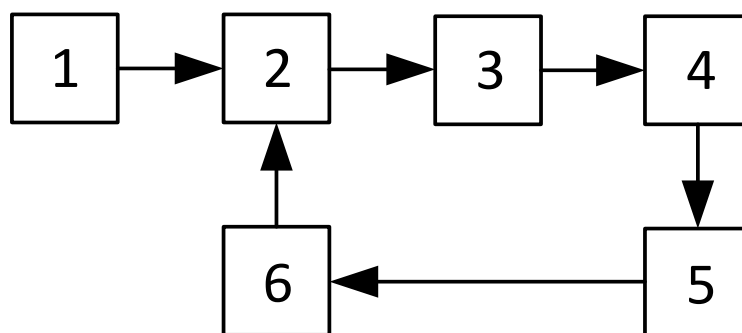


Рисунок 3.6 – Структурная схема устройства уменьшения фона

Устройство состоит из следующих элементов: детектор (1), вычитатель (2), усилитель (3), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (4), процессор (5), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) (6).

Устройство работает следующим образом: после детектора (1) сигнал поступает в вычитатель (2), затем увеличивается усилителем (3), с выхода

усилителя (3) сигнал передаётся на АЦП (4), цифровой код соответствующий лидарному сигналу, в соответствии с частотой зондирования, считывается процессором (5) для последующей обработки сигнала, процессор (5) вычисляет постоянную составляющую в сигнале и выдаёт сигнал на ЦАП (6), который вырабатывает сигнал, поступающий на вход для вычитателя (2).

Схема приёмной части лидара с устройством уменьшения фона приведена на рисунке 3.7.

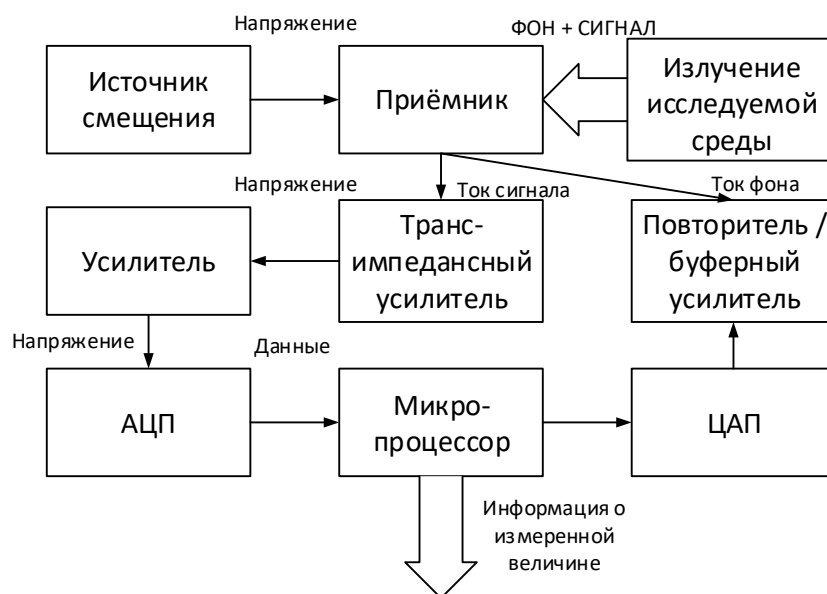


Рисунок 3.7 – Схема приёмной части лидара с устройством уменьшения фона

Предложенное решение позволяет снизить требования к оптическим фильтрам системы и при этом сохранить динамический диапазон. При этом нужно учитывать динамический диапазон самого приёмника, который не должен превышать.

Таким образом, разработано устройство уменьшения влияния фоновой засветки на приёмный тракт прибора контроля высоты нижней границы облачности, с замкнутой цифровой обратной связью через АЦП-ЦАП и постоянной времени равной периоду модуляции зондирующего излучения, при использовании приёмника с токовым выходом, типичным динамическим диапазоном $>10^6$ и при соотношении $\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}}$ до 10^{-5} .

The schematic diagram illustrates the AD8605ART evaluation board circuit. Key components and their connections include:

- AD8605ART:** A precision op-amp configured as a voltage follower. Its non-inverting input (+) is connected to the output of the DA2:A OPA2277 op-amp. The inverting input (-) is connected to the output of the AD8605ART itself. The output (1) is connected to the -VCC line.
- DA2:A OPA2277:** A precision op-amp configured as a voltage follower. Its non-inverting input (+) is connected to the output of the AD8605ART. The inverting input (-) is connected to the output of the DA2:A OPA2277 itself. The output (2) is connected to the -VCC line.
- DA4:A OPA2277:** A precision op-amp configured as a voltage follower. Its non-inverting input (+) is connected to the output of the DA2:A OPA2277. The inverting input (-) is connected to the output of the DA4:A OPA2277 itself. The output (1) is connected to the -VCC line.
- Passive Components:**
 - Resistors:** R1 (10M), R2 (100), R3 (10k), R4 (10k), R5 (22k), R6 (1k), R7 (1k), R8 (10k), R9 (10k), R10 (10k), R11 (10k), R12 (10k).
 - Capacitors:** C1 (100nF), C2 (100nF), C3 (100nF), C4 (100nF), C5 (100nF), C6 (100nF), C7 (100nF), C8 (100nF), C9 (100nF), C10 (100nF), C11 (100nF).
 - Diode:** VD1 (1N4148).
- Power Supply:** The circuit is powered by a -VCC supply (negative voltage) and a GND (ground) connection. A -VCC_PRE input is also shown.
- LED:** A -VCC_BACKS_LED is connected to the output of the DA4:A OPA2277.

Здесь приведено типовое схемотехническое решение для приёмного тракта лидара, в качестве детектора выступает лавинный фотодиод VD1, на операционном усилителе DA1 выполнен трансимпедансный усилитель (преобразователь тока в напряжение) с частотной компенсацией на C3, DA2:A и DA4:B выполняют функцию повторителей, DA4:A инвертирующий усилитель, цепочка R4, R6, R7, C8 задаёт рабочую точку DA1 по постоянному току.

Рисунок 3.9 показывает возможную реализацию предложенного способа.

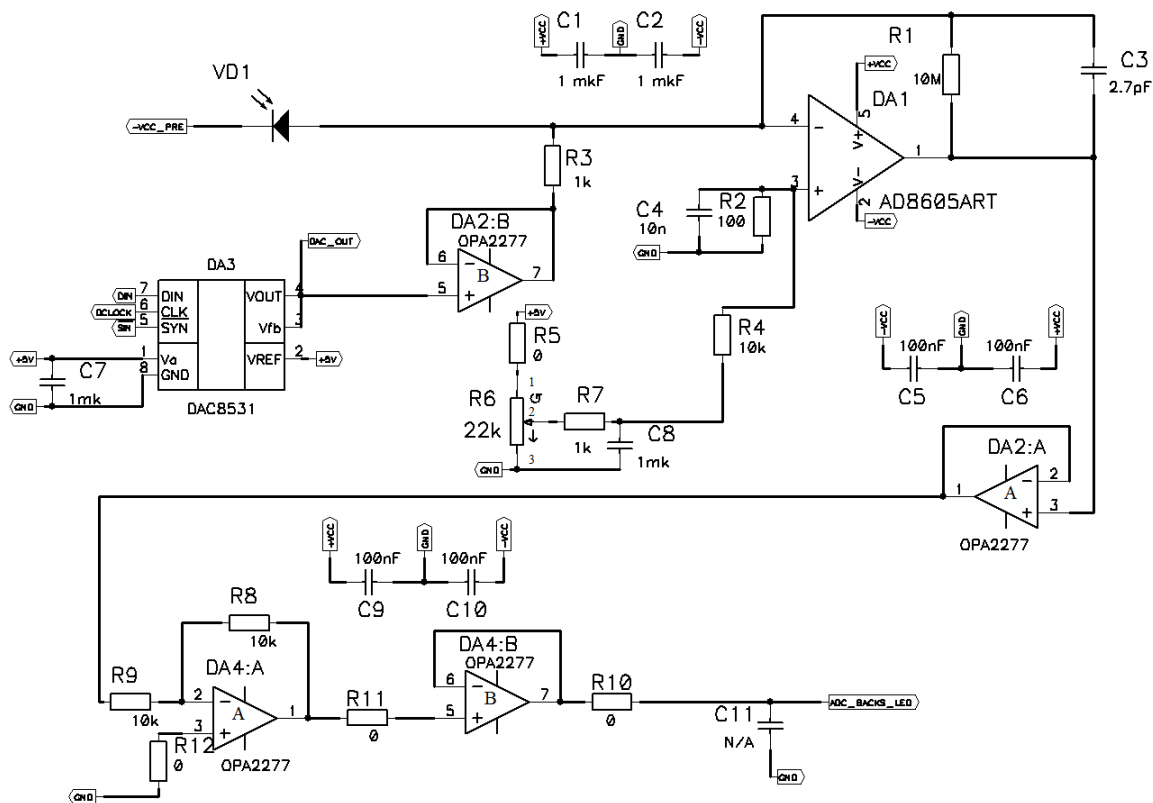


Рисунок 3.9 – Устройство уменьшение фона

В данной схеме добавлен повторитель на операционном усилителе DA2 и цифроаналоговый преобразователь на микросхеме DA3, управляемый микроконтроллером по программе, описание которой приведено ниже.

3.3.2 Программная часть

Программа вычисления и уменьшения фона в лидарном сигнале выполняется в приборе контроля высоты нижней границы облачности в виде подпрограммы, вызываемой на частоте работы лазера перед его запуском.

Рисунок 3.10 отображает алгоритм подпрограммы вычисления и уменьшения фона.

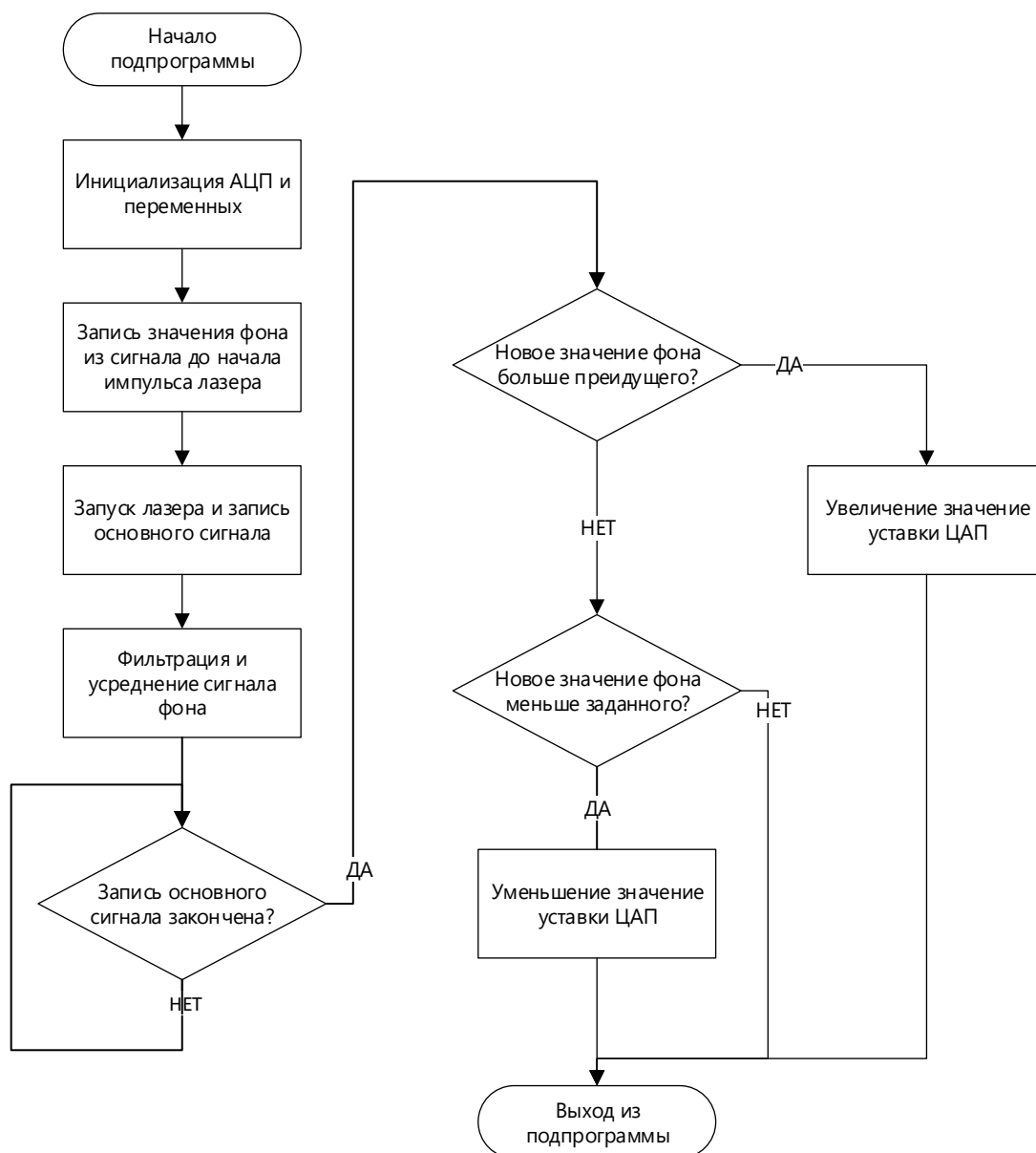


Рисунок 3.10 – Алгоритм уменьшения фона

Программа построена на линейном алгоритме. При запуске очередного такта вызывается данная подпрограмма, сохраняется предыдущее вычисленное значение фона, затем записывается 128 значений с АЦП для усреднения. Далее производится инициализация, запуск лазера и системы записи сигнала с АЦП в FIFO. По завершении записи лидарного сигнала новое и старое вычисленные значения фона сравниваются и если вычисленное значение фона больше предыдущего, то увеличивается значение уставки (с учётом не превышения максимально возможного значения), отправляемой в ЦАП в нужный такт основной программы в подпрограмме обмена процессора и ЦАП. Если же вычисленное значение фона меньше значения, выбранного как минимальное рабочее, то значение уставки ЦАП

уменьшается, вплоть до нулевого значения. Выходное напряжение ЦАП, преобразованное в ток, в свою очередь смещает рабочую точку транзисторного усилителя и, соответственно, нормирует фоновую составляющую в регистрируемом сигнале, поступающем дальше по приёмному тракту прибора контроля высоты нижней границы облачности.

3.4 Выводы

Таким образом, установлено, что при применении лазерных диодов в серийном и мелкосерийном производстве оптоэлектронных приборов, для выбора оптического фильтра, необходимо учитывать не только ширину линии генерации источника излучения, но и температуру работы и разброс параметров экземпляров лазерных диодов. Например, для использования всей мощности излучения лазерных диодов SPL LL90_3, фирмы OSRAM, без предварительной выбраковки, необходимо использовать фильтр с пропусканием больше чем в 3 раза шире полосы излучения (25нм/7нм). Что существенно, увеличивает фоновую составляющую в сигнале и увеличивает требования к динамическому диапазону приёмного тракта прибора контроля высоты нижней границы облачности. Вместе с тем, предложены алгоритм и схемные решения с помощью которых разработан и апробирован узел для сжатия динамического диапазона сигнала, поступающего на вход усилителя.

4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЫСОТЕ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

Для функционирования прибора контроля высоты нижней границы облачности разработан программный комплекс, который состоит из 3 программ:

- Программа микропроцессора, которая занимается сбором, накоплением и первичной обработкой эхосигналов, по данным, полученным из аппаратных измерений с платы АЦП прибора контроля высоты нижней границы облачности;
- Программа обмена между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером, основное назначение которой состоит в передаче и быстром сохранении полученных данных от прибора контроля высоты нижней границы облачности на ПК с целью дальнейшей обработки и расчета высоты нижней границы облачности;
- Программа контроля высоты нижней границы облачности. Область применения программы – визуализация результатов расчетов. Основное назначение программы – обработка получаемых от прибора контроля высоты нижней границы облачности данных. Программа предназначена для сбора данных, их обработки для получения высоты облачности и выдачи обработанных данных в текстовом и графическом виде в соответствующих файлах.

На все программы, составляющие программный комплекс, получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, указанные в приложении Б.

4.1 Описание программы микропроцессора

В настоящем разделе приводится описание программы микропроцессора. Программа применяется для управления микропроцессором установленном на плате, который обеспечивает работу прибора в целом. То есть управление различными электронными устройствами и осуществление взаимодействия между ними, а именно:

- управление лазерным диодом;
- управление источником питания лавинного фотодиода с учётом температуры внутри прибора;
- управление нагревателем;
- сбор и накопление данных из АЦП;
- расчёт среднего значения сигнала в каждой ячейке массива;
- обмен данными по протоколу MODBUS.

Программа процессора построена по схеме циклического алгоритма с обработчиками прерываний, состоящей из следующих блоков:

- 1) Инициализация - подготовка к запуску.
- 2) Основной цикл. Во время основного цикла производится обработка некритичных ко времени задач и ожидание прерываний.
- 3) Обработчик прерываний от таймера 0.
- 4) Обработчик прерываний от последовательного порта SCI.

Прибор может находиться в двух состояниях (статусах): 0 – зондирование атмосферы, накопление данных или 1 – данные готовы для считывания. После включения статус прибора устанавливается равным 0. После получения усреднённых данных статус устанавливается равным 1. Программа передачи данных по протоколу MODBUS периодически считывает статус и когда он становится 1, скачивает данные на ПК, далее передаёт новые настройки, и затем устанавливает статус 0, что запускает начало следующей серии.

4.1.1 Алгоритм программы

Основная программа в первую очередь производит инициализацию периферийных устройств и процессора – таймером 0 устанавливается период прерывания программы равный 222 мкс и разрешаются прерывания от таймера и последовательного порта. После этого программа входит в бесконечный цикл, где проверяется событие получения запроса MODBUS, при появлении которого вызывается функция его обработки. Последовательный порт функционирует следующим образом: при каждом получении символа происходит прерывание он добавляется в буферный массив, а по завершении приёма всей посылки взводится

флаг, и основная программа вызывает подпрограмму обработки запроса по протоколу MODBUS. Блок-схема основной программы приведена на рисунке 4.1.

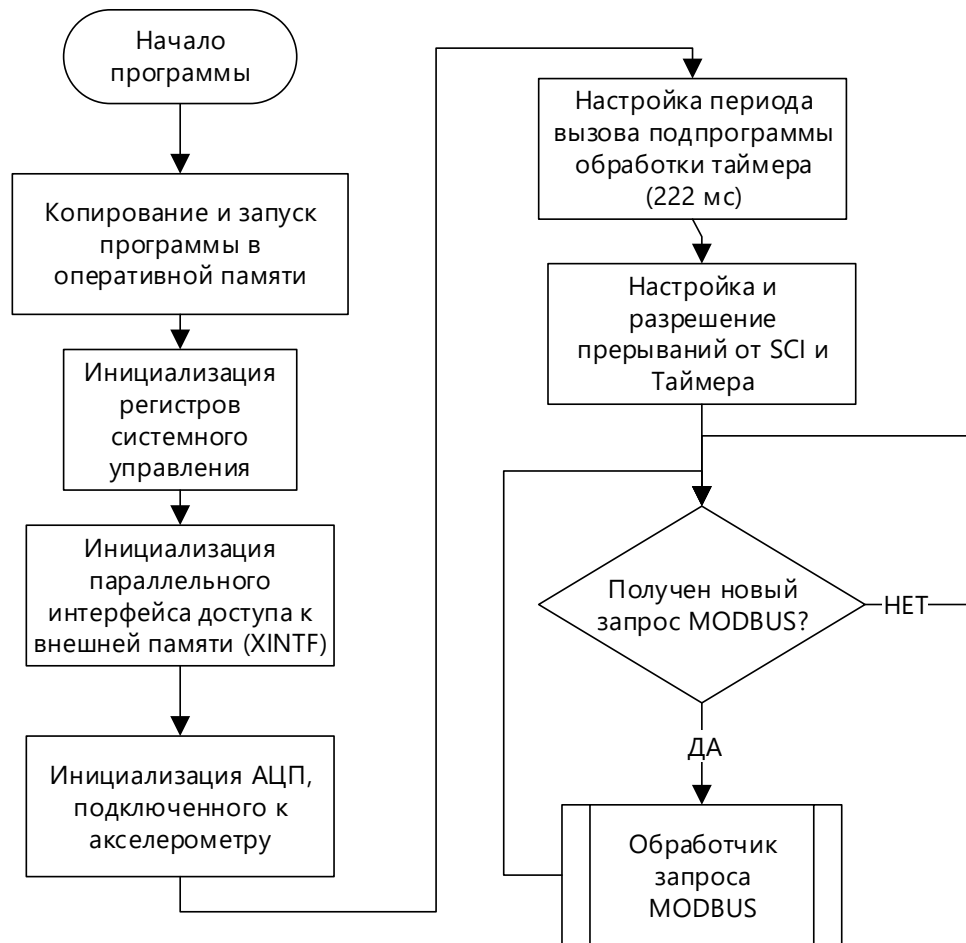


Рисунок 4.1 – Блок-схема основной программы

Подпрограмма обработки прерывания от таймера 0 вызывается каждые 222 мкс, вызывает подпрограмму Lidar_loop, которая считывает данные из FIFO, сохраняет, суммирует или производит усреднение полученных данных. Блок-схема подпрограммы Lidar_loop приведена на рисунке 4.2.

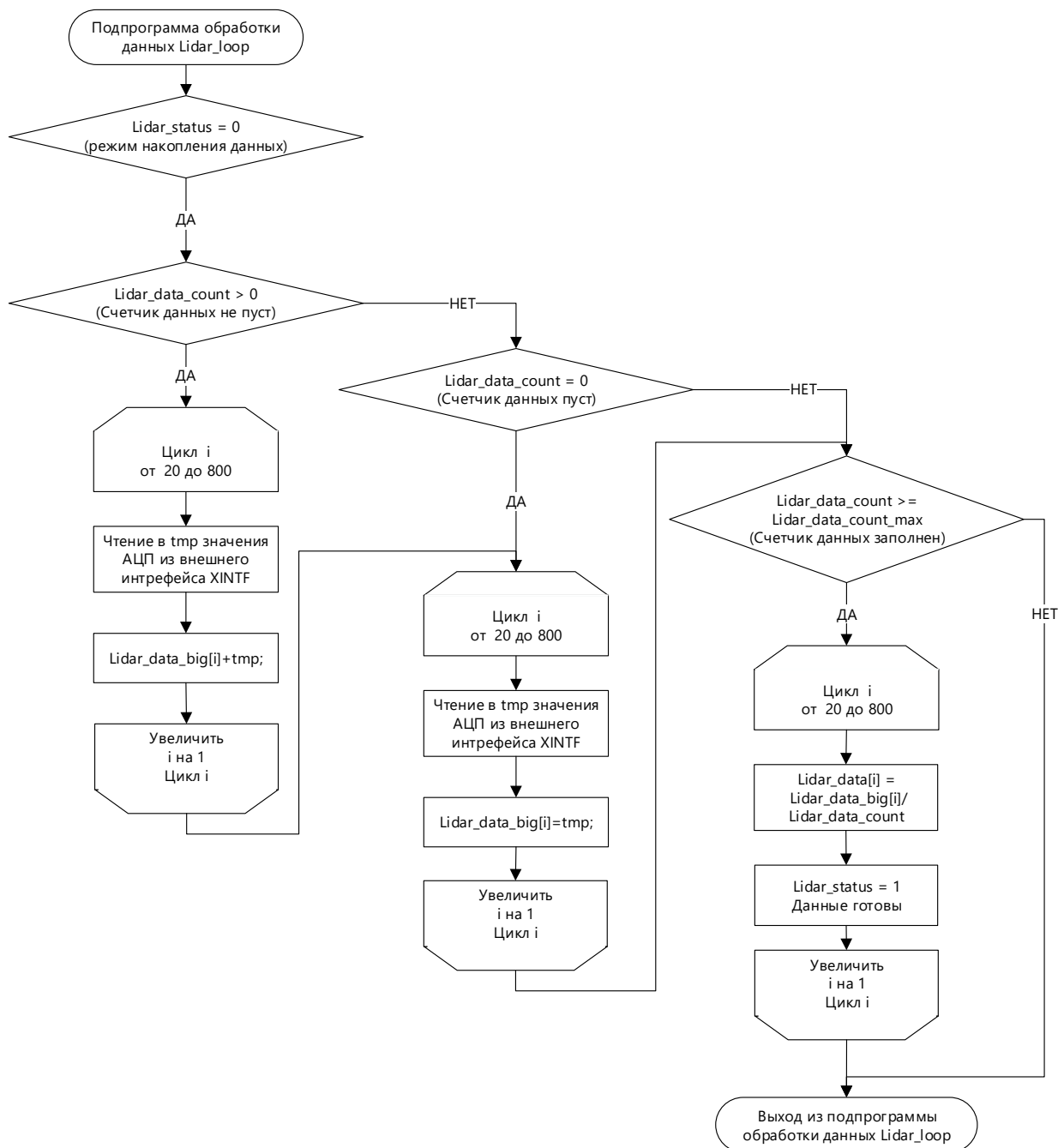


Рисунок 4.2 – Блок-схема подпрограммы Lidar_loop

Также через каждые 5000 вызовов подпрограмм обработки прерывания от таймера 0, т.е. через 1,11 с опрашивается датчик температуры на основании этой информации корректируется напряжение смещения. Блок-схема подпрограммы обработки прерывания от таймера 0 приведена на рисунке 4.3.

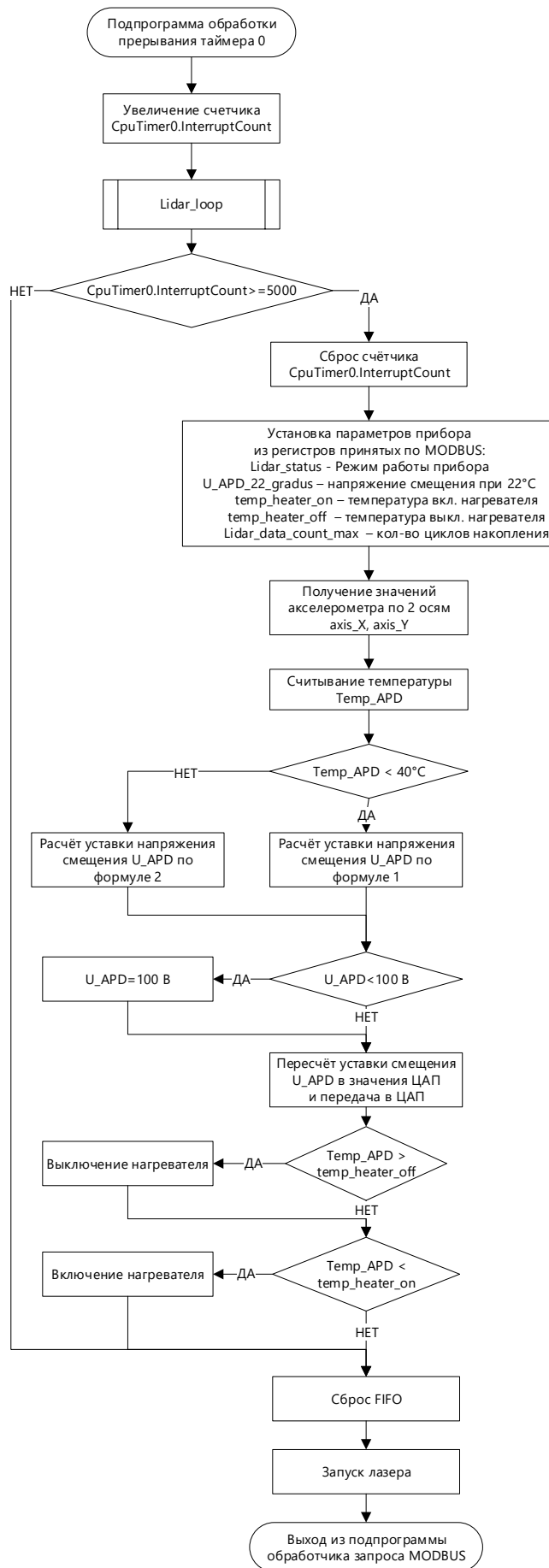


Рисунок 4.3 – Блок-схема подпрограммы обработки прерывания от таймера 0

Функционирование подпрограммы обработки запроса по протоколу MODBUS основано на упрощённом алгоритме, приведенном в спецификации на протокол MODBUS, так как используется только 2 функции (чтение и запись HOLDING REGISTERS). Блок-схема подпрограммы обработки запроса протоколу MODBUS приведена на рисунке 4.4.

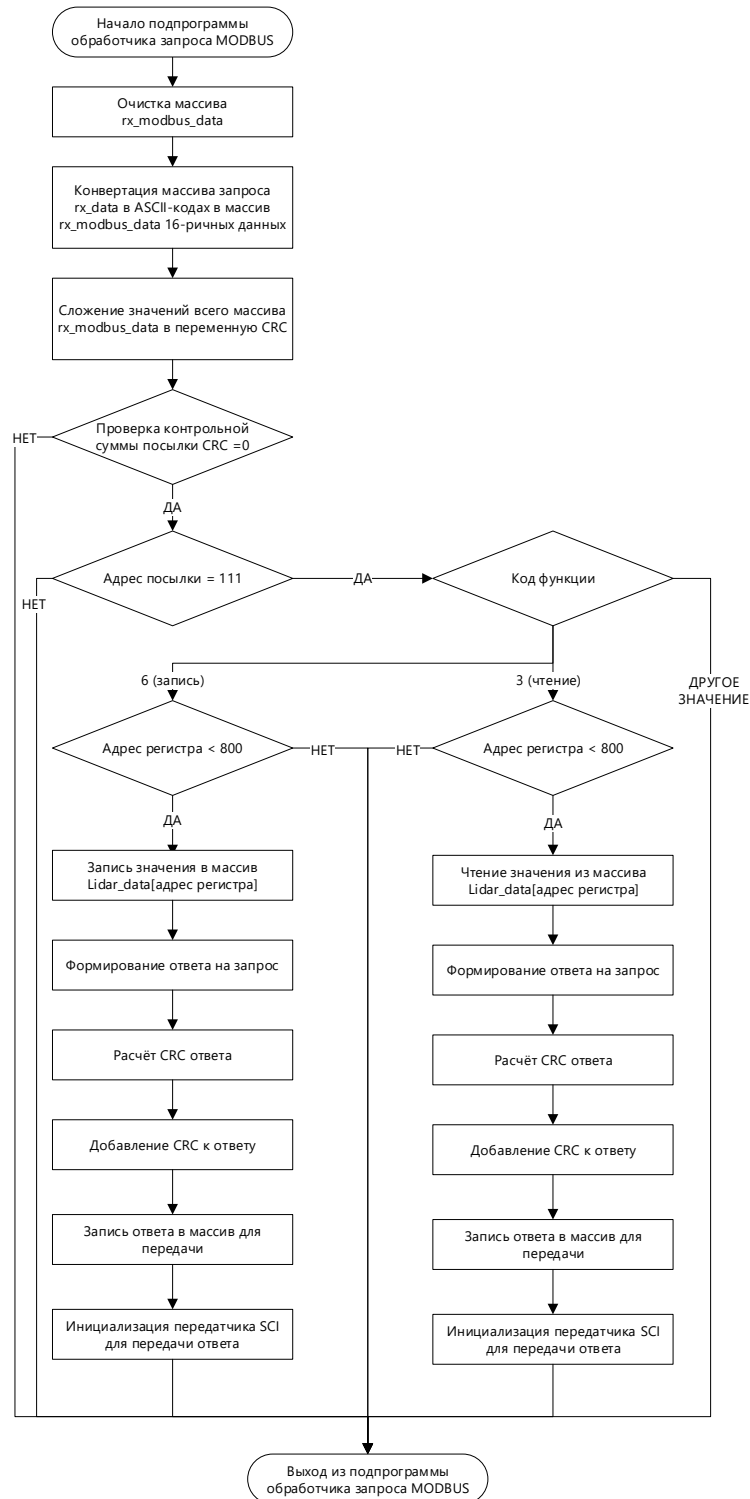


Рисунок 4.4 – Блок-схема подпрограммы обработки запроса протоколу MODBUS

При несоответствии контрольной суммы, адреса устройства, функции, номера регистра за пределами памяти происходит выход из подпрограммы. Полученная посылка преобразуется из ASCII – кодов в шестнадцатеричные коды, проверяется контрольная сумма, функция, номера регистра, и в зависимости от заданной функции происходит или чтение, или запись значения регистра, формируется ответ и настраивается последовательный порт для передачи ответа. Расчёт контрольной суммы запроса также производится по алгоритму, приведенному в спецификации и руководство по внедрению MODBUS по последовательной линии [77].

4.1.2 Используемые методы обработки данных

Для первичной обработки накопленных данных в течении заданного количества циклов производится расчёт среднего или математического ожидания для значения сигнала в каждой ячейке массива по формуле:

$$\text{Lidar data}_i = \frac{\text{Lidar data big}_i}{N} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{ADC}_{ik} \quad (4.1)$$

где Lidar data - массив данных, готовых к передаче на ПК,

Lidar data big - массив накопленных данных,

ADC - значение, считанное из АЦП через FIFO,

N-количество циклов,

i - номер ячейки.

Программу выполняет 32-разрядный цифровой высокопроизводительный сигнальный процессор с фиксированной точкой TMS320F2812PGF.

4.2 Описание программы передачи параметров и записи данных

Основное назначение программы – это обмен данными между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером, а именно – сохранение полученных данных от прибора контроля высоты нижней границы облачности на ПК с целью дальнейшей обработки и расчета высоты нижней границы облачности.

Программа решает следующие задачи:

- 1) Работа прибора контроля высоты нижней границы облачности должна осуществляться по протоколу Modbus RTU [78] со следующими параметрами протокола передачи данных:
 - 1.1) Метод передачи данных – ASCII;
 - 1.2) Порт подключения – выбирается самостоятельно путем внесения правки в исходный код программы (COM1, COM2...);
 - 1.3) Размер байта – 8 бит;
 - 1.4) Кол-во бод – 9600;
 - 1.5) Паритет четности – Нет;
 - 1.6) Кол-во стоп-бит – 1;
- 2) Непрерывное получение и сохранение данных из прибора контроля высоты нижней границы облачности на ПК в текстовом формате с маской имени файла в виде текущего системного времени;
- 3) Запрос конфигурационных параметров из конфигурационного текстового файла и запись в прибор;
- 4) Начинать работу по команде запуска.

4.2.1 Описание алгоритма и функционирования программы

Для решения поставленной задачи была использована комбинация из линейного и циклического алгоритмов т.к. необходимо осуществлять первичную конфигурацию при подключении к прибору, используя линейный алгоритм, и производить постоянный опрос прибора в течении работы программы используя циклический и линейный алгоритмы.

А именно:

- После запуска программы подключаются библиотеки pyserial [79] версии 3.5 и pymodbus [80] версии 2.5.3 для работы через COM/USB порт по протоколу Modbus.
- Задаются параметры серийного порта и протокола modbus.
- Выполняется подключение к плате процессора.
- Запускается бесконечный главный цикл.

- Выполняется чтение 800 регистров modbus.
- Выполняется запись прочитанных регистров в текстовый файл, расположенный в директории, указанной в переменной «path_save» текста программы. Имя файла представляет из себя год, месяц, день, часы, минуты, секунды с расширением «.txt».
- Выполняется перезапись файла «last_data.txt» в директории, указанной в переменной «path_save» текста программы.
- Выполняется чтение файла конфигурации в директории «path_save» с именем «ivngo_config.txt» и запись прочитанных данных.

Съем данных происходит от 12 с до 1000 с. После чего передача данных на компьютер (ПК) осуществляется со скоростью 9600 бод = 960 байт/с. Кол-во данных, которое передается за 1 цикл приема данных - $800 \cdot 8 \text{ бит/с} = 800 \text{ байт/с}$.

Такой скорости достаточно, чтобы успевать сохранять полученные данные на локальном носителе компьютера в текстовом формате.

Входными данными для программы является конфигурационный файл «ivngo_config.txt», путь до которого задается в исходном коде программы.

Выходными данными программы является массив данных, состоящий из 800 значений регистров протокола Modbus, которые размещаются построчно в текстовом файле для дальнейшей работы.

Для решения поставленной задачи был использован высокоуровневый язык программирования общего назначения – Python. Разработка ПО на данном языке не имеет привязки к аппаратной и программной платформе компьютера ПК, что является одним из главных преимуществ при выборе средств разработки ПО:

- Программа легко модифицируется в случае изменения требований;
- Программа легко переносится в случае необходимости развертывания на широком спектре аппаратных и программных платформ;
- Программа занимает всего – 4 Кб текстовой информации без учета комментариев к исходному коду.

Данные технико-экономические характеристики позволяют минимизировать затраты и время на техническое обслуживание программного обеспечения прибора

контроля высоты нижней границы облачности, повысить производительность труда и наиболее полно использовать вычислительные ресурсы компьютера.

4.3 Описание программы визуализации результатов расчетов высоты нижней границы облачности

Область применения программы – визуализация результатов расчетов. Программа предназначена для сбора данных, их обработки для получения высоты облачности и выдачу обработанных данных в текстовом и графическом виде в соответствующих файлах.

4.3.1 Алгоритм, используемые методы и структура программы

Мощность сигнала на входе фотодетектора $P(t)$, отраженного из атмосферы в приближении однократного рассеяния описывается следующим выражением [81], [72]:

$$P(t) = \frac{G(R)P_0Sc\Delta\tau\beta(R)T^2(R)}{2R^2} \quad (4.2)$$

где $G(R)$ – геометрическая функция прибора контроля высоты нижней границы облачности,

P_0 – пиковая мощность излученного импульса,

S – площадь приемного объектива,

c – скорость света,

$\Delta\tau$ – временная длительность зондирующего импульса,

$\beta(R)$ – коэффициент обратного рассеяния на расстоянии R ,

$T(R)$ – прозрачность слоя атмосферы от прибора контроля высоты нижней границы облачности до объекта зондирования,

$$T(R) = \exp\left(-\int_0^R \alpha(R) dR\right) \quad (4.3)$$

где $\alpha(R)$ – объемный коэффициент рассеяния на расстоянии R ,

R – дальность от прибора контроля высоты нижней границы облачности до объекта зондирования.

В связи с применением в приборе контроля высоты нижней границы облачности технических и схемных решений сигнал на входе АЦП имеет форму отрицательного выброса при положительном смещении, что показано на рисунке 4.5.

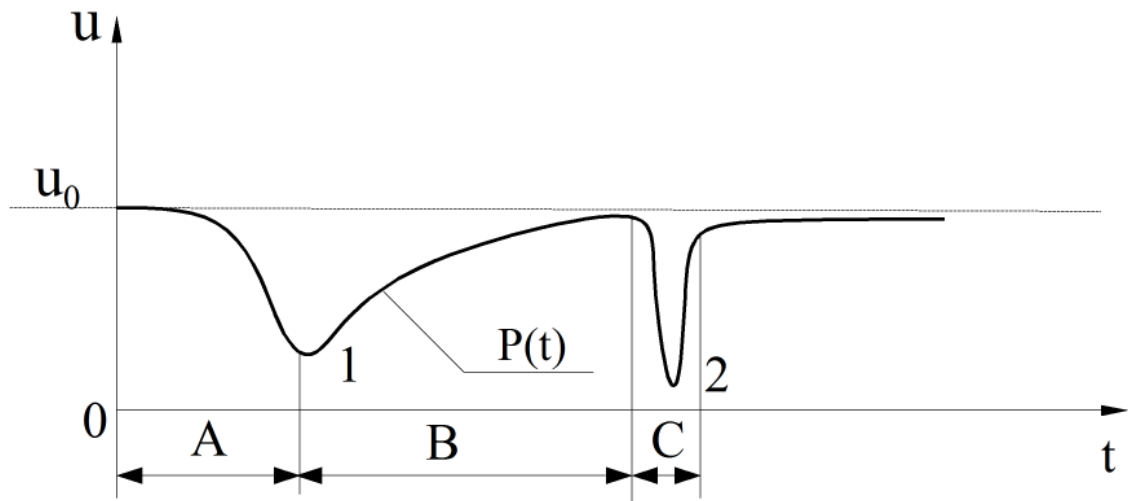


Рисунок 4.5 – Форма сигнала, получаемого от прибора контроля высоты нижней границы облачности

На рисунке 4.5 показан уровень сигнала $P(t)$ в зависимости от времени t , U_0 - уровень постоянного смещения и изображены сигнал 1, отраженный от аэрозоля, содержащегося в атмосфере, и сигнал 2, отраженный от облака. Сигнал является идеализированным, так как на нем отсутствуют шумы и помехи, в той или иной степени всегда присутствующие в реальном сигнале [82], [83].

Можно выделить три зоны: А, В и С. Каждая из них обладает особенностями [84].

Зона А является дистанцией, в которой формируется рассеивающий объем прибора контроля высоты нижней границы облачности. Геометрия формирования рассеивающего объема показана на рисунке 4.6.

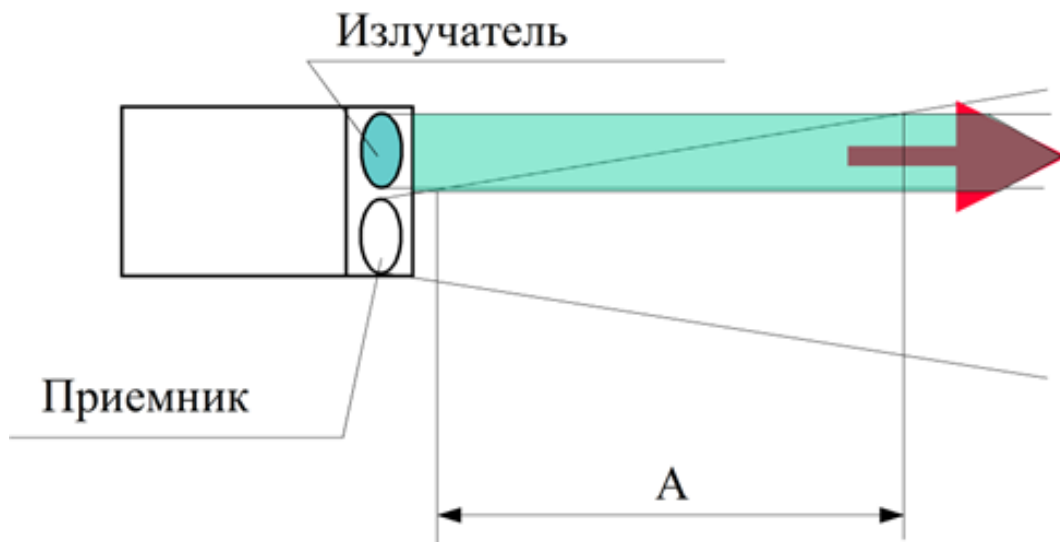


Рисунок 4.6 – Схема формирования геометрической функции прибора контроля высоты нижней границы облачности

Зона А – это дистанция формирования геометрической функции $G(R)$ лидара за счет того, что излученный импульс постепенно входит в сектор поля видимости приемной системы. Точный расчет геометрической функции в общем случае является сложной задачей, и поэтому ее часто аппроксимируют какой-либо монотонно возрастающей от 0 до 1 функцией. В нашем случае применяется функция нормального распределения Гаусса 6. 7.

$$f(R) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^L \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dR \quad (4.4)$$

Параметры распределения μ и σ подбираются таким образом, чтобы интегральная функция распределения (4.4) на расстоянии $L=100$ м была достаточно близка к единице. В нашем случае использовались параметры распределения $\mu=5$, $\sigma=2$, что обеспечивает аппроксимирующее значение геометрической функции 0,99 на дальности 100 м, что соответствует 12 отсчетам АЦП при частоте дискретизации сигнала 20 МГц. Учет геометрической функции необходим для того, чтобы корректно интерпретировать сигналы, поступающие из зоны А. Поэтому для зоны А сигнал для обработки формируется с учетом геометрической функции $G(R)$.

Учет ближней зоны необходим в том случае, когда облако на трассе зондирования, высоту которого необходимо определить, находится в зоне А, то

есть в зоне формирования геометрической функции $G(R)$ прибора контроля высоты нижней границы облачности.

Зона В – это дистанция, на которой световой импульс уже полностью вошел в поле зрения приемной системы и далее распространяется в нем. Геометрическая функция здесь равна единице, а сигнал из этой зоны описывается уравнением (4.2) и, в основном, уменьшается за счет квадратичного ослабления с увеличением расстояния. Ослабление сигнала здесь пропорционально квадрату расстояния, а это приводит к увеличению динамического диапазона принимаемого сигнала. Для компенсации этого ослабления сигнал обычно умножают на квадрат расстояния, то есть $F(R)=s(r) R^2$. Однако это правило выполняется тогда, когда суммарный уровень шумов и помех $N(t)$ существенно меньше уровня полезного сигнала $F(t)$. При уровнях сигнала, сравнимых с уровнем $N(t)$ или даже меньше его, умножать сигнал на R^2 нет смысла, так как вместе с сигналом квадратично возрастет и уровень $N(t)$.

Зона С – это зона, в которой лазерный импульс встретил облачное образование, в котором резко (на несколько порядков) возрастает величина коэффициента обратного рассеяния $\beta(R)$. Основная задача программы обработки – это обнаружение зоны С на трассе зондирования (разумеется, при наличии облачности на трассе). Задача осложняется тем, что при реальных условиях работы прибора в сигналах обязательно присутствует шум, особенно в дневных условиях. При этом по своим физическим характеристикам параметры отраженного от облака сигнала близки к параметрам шума [85], [86]. Следовательно, нужно избавлять сигнал от шумовой составляющей (или, по крайней мере, значительно ослаблять ее). С этой целью используется экспоненциальный фильтр низкой частоты [87], который в несколько раз ослабляет влияние шумовой компоненты.

Сигнал, получаемый от прибора контроля высоты нижней границы облачности, не очень удобен для проведения математических операций. Поэтому над ним производится следующее действие:

Сигнал нормализуется и инвертируется относительно уровня U_0 , то есть проводится операция

$$F(t) = U_0 - s(t) \quad (4.5)$$

где $s(t)$ - сигнал, получаемый от прибора контроля высоты нижней границы облачности,

U_0 - уровень постоянной составляющей в сигнале.

Предполагается, что для всех дальностей выполняется неравенство $U_0 > s(t)$, иначе выходной сигнал $F(t)$ будет ограничиваться по амплитуде. В результате этой операции сигнал $F(t)$ будет иметь вид, представленный на рисунке 4.7.

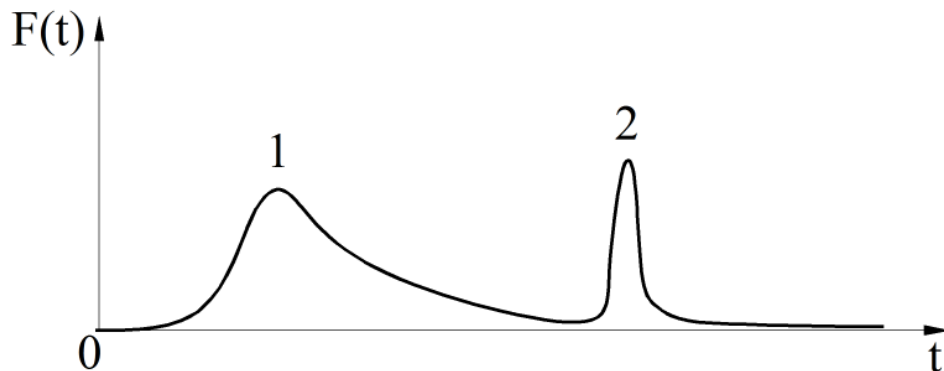


Рисунок 4.7 – Вид сигнала, поступающего от прибора контроля высоты нижней границы облачности, после нормализации

После этого сигнал поступает на обработку, которую осуществляет процедура `File_Process`. Так как разница в уровнях сигнала из ближней зоны (вблизи прибора контроля высоты нижней границы облачности) и из дальней зоны очень велика и может различаться на 2-3 порядка, вся трасса условно разбита на два участка:

Ближняя зона. Участок трассы от 0 до дальности 300 м.

Дальняя зона. Участок трассы от 300 до 3000 м.

Обработка сигналов с прибора контроля высоты нижней границы облачности производится отдельно для двух зон и результаты расчетов выдаются на информационное табло в виде двух цифр, соответственно из ближней и дальней зон. На рисунке 4.8 представлен сигнал от прибора контроля высоты нижней границы облачности и рассчитанная кривая, которая выделена красным цветом.

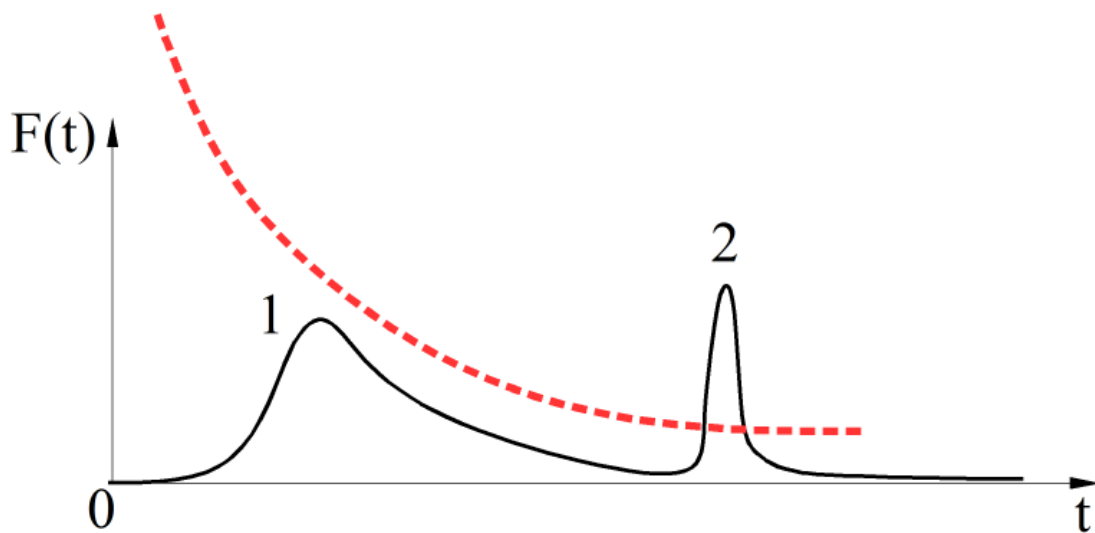


Рисунок 4.8 – Сравнение сигнала прибора контроля высоты нижней границы облачности и рассчитанная кривая (красный цвет)

Кривая рассчитана с помощью процедуры Approximation и выводится на график вместе с сигналами от прибора контроля высоты нижней границы облачности. При этом происходит сравнение уровней сигналов от прибора контроля высоты нижней границы облачности и рассчитанных на дистанции от 0 до 3000 м. Если сигнал от прибора контроля высоты нижней границы облачности на дальности R превышает рассчитанный уровень, программа трактует это как наличие облачности на этой высоте. При этом программа ищет основание («подошву») сигнального пика и считает, что самая нижняя точка основания пика соответствует нижней границе облачности. Информация о наличии или отсутствии облачности выдается на табло, расположенном ниже графика.

Для решения поставленной задачи была использована комбинация из линейного и циклического алгоритмов. Линейный алгоритм позволяет осуществлять первичную конфигурацию выбора параметров расчета высоты границы нижней облачности, а затем, используя циклический алгоритм, происходит периодическая обработка файлов, создаваемых программой обмена между прибором контроля высоты нижней границы облачности и компьютером. Блок схема основной части программы приведена на рисунке 4.9.

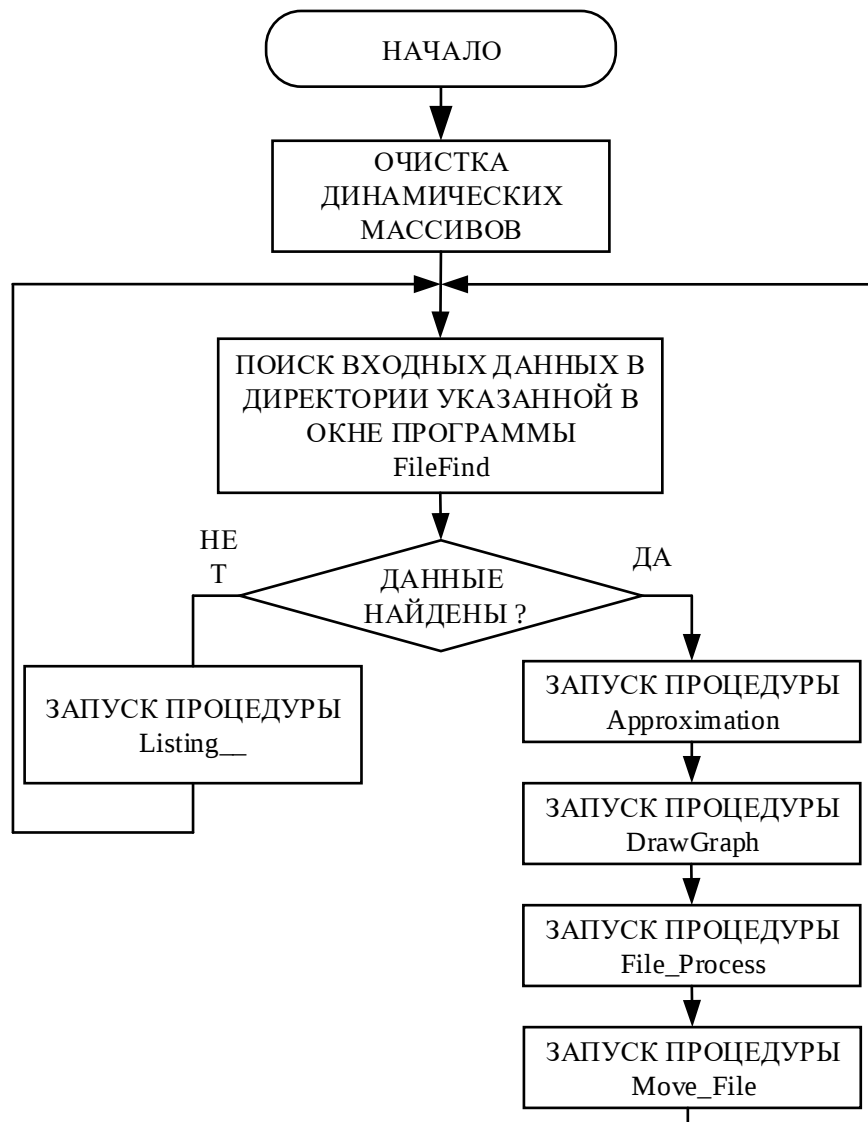


Рисунок 4.9 – Блок схема основной части программы

Функция FileFind предназначена для поиска данных, поступающих с прибора контроля высоты нижней границы облачности, создания списка файлов и определения количества файлов для обработки. Процедура Approximation выполняет расчет функции из найденного файла, значения которой сравниваются с сигналами, в качестве аппроксимирующей функции принята экспонента и рассчитывается так, чтобы пройти через две точки, которые расположены в начале и в конце трассы зондирования (на дальностях 15 м и 3000 м соответственно).

Процедура DrawGraph выполняет функции графического дисплея и выводит сигнал, записанный в диапазоне дальностей 0 – 3000 м и две кривые аппроксимации, одна из которых лежит в середине сигнала в дальней зоне, а вторая рассчитывается на основе данных для ближней и дальней зоны соответственно.

Процедура File_Process является одной из основных процедур проекта, где производится анализ поступившего на обработку сигнала и принимается решение о характеристике облачности или ее отсутствии в автоматическом режиме. Процедура File_Process выполняется последовательно.

Находится число отсчетов, которое определяется границей ближней зоны. Исходное значение равно 300 м и может быть изменено в процессе обработки. В промежутке от 0 до этого значения проверяется превышение уровня сигнала над граничным уровнем. При выполнении условия (превышение сигнала) фиксируется пик сигнала и соответствующее значение высоты.

Далее находится минимум, принадлежащий обнаруженному пику с нижней стороны. Соответствующее минимуму значение высотного уровня пересчитывается в величину, соответствующую высоте нижней границы облака, находящемуся в ближней зоне (то есть от 0 до 300 м).

Обработка дальней зоны происходит аналогичным образом. При наличии сигнала от облака в дальней зоне, о чем свидетельствует превышение сигнала над соответствующими расчетными значениями, фиксируется пик сигнала и находится величина, обозначающая высоту нижней границы облачности, обнаруженной в дальней зоне (свыше 300 м).

Отметим, что высота облачности рассчитывается с учетом высоты над земной поверхностью, на которой расположен прибор контроля высоты нижней границы облачности. После расчета высоты облачности производится запись полученных значений в файл.

На рисунке 4.10 приведена главная форма программы обработки, работающей в автоматическом режиме с обозначениями. При этом размер формы устанавливается в соответствии с размерами экрана ПЭВМ пользователя.

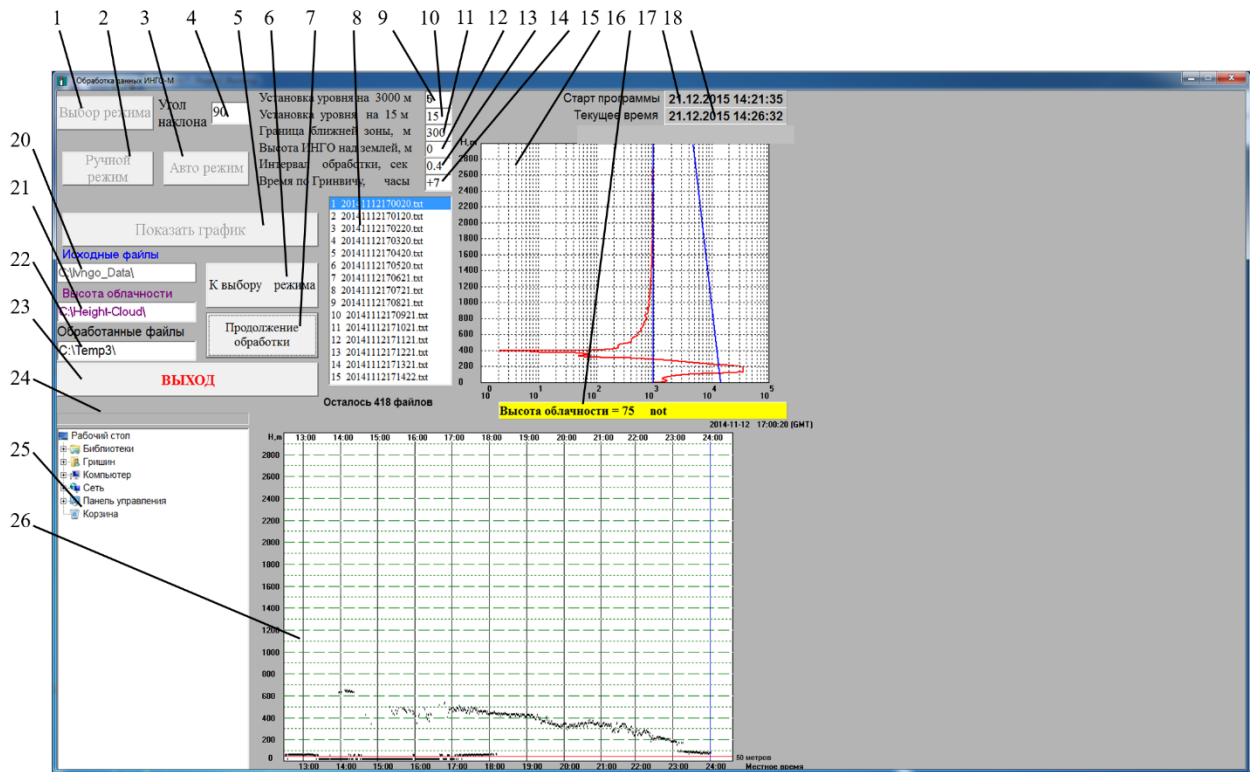


Рисунок 4.10 – Главная форма программы обработки

1. Кнопка «Выбор режима». При ее нажатии становятся активными кнопки «Ручной режим» и «Автоматический режим».
2. Кнопка «Ручной режим». При ее нажатии появляется стандартное Windows-окно, содержащее список файлов во входной директории (окно 19 на рис. 4.10). Нужный файл выбирается двойным кликом. Далее процедура определения высоты облачности описана в разделе «Работа программы» «Ручной режим».
3. Кнопка «Автоматический режим». При ее нажатии начинается обработка данных в автоматическом режиме данных, записанных во входной директории (окно 20). Данные обработки записываются в выходной файл (окно 21). При этом обработка начинается, только если число файлов в этой директории больше двух. Это сделано для того, чтобы исключить обработку не закрытых файлов (находящихся в стадии записи).
4. Окно «Угол наклона». Используется только для чтения, если прибор контроля высоты нижней границы облачности установлен не вертикально. Угол наклона применяется для корректировки рассчитанной высоты облачности.

5. Кнопка «Показать график». Становится активной в ручном режиме после выбора нужного файла. При ее нажатии в окне 15 появляется график сигнала, производится загрузка изображения сигнала в динамическую память, при этом положение курсора фиксируется в левой стороне формы. После окончания загрузки становится возможным перевод курсора в область изображения для ручного определения высоты облаков.
6. Кнопка «К выбору режима». Становится активной вначале работы, после обработки графика в ручном режиме и при нажатии кнопки №7 «Пауза». При ее нажатии становится активной кнопка «Выбор режима» (кнопка 1) и появляется диалоговое окно с надписью «Изменить высоту ИНГО над землей?». При утвердительном ответе фокус перемещается в окно №12. Используется также, если нужно сменить режим обработки.
7. Кнопка «Пауза-Продолжение обработки». Используется для прерывания обработки в автоматическом режиме. При этом становится возможным изменять параметры обработки (окна 9-14).
8. Окно «Список файлов для обработки». Используется только для чтения. Служит для визуального контроля списка ближайших пятнадцати обрабатываемых файлов и их положения в списке по мере обработки.
9. Окно установки уровня превышения сигнала в дальней зоне (3000 метров) от сигнала из безоблачной атмосферы. При превышении данного уровня сигнал считается отраженным от облака. По умолчанию уровень превышения в дальней зоне равен 3.
10. Окно установки уровня превышения сигнала в ближней зоне (15 метров) от сигнала из безоблачной атмосферы. При превышении данного уровня сигнал считается отраженным от облака. По умолчанию уровень превышения в ближней зоне равен 20.
11. Окно установки расстояния до условной границы между ближней и дальней зонами.
12. Окно «Высота над землей». Устанавливается до начала или после начала работы, если прибор контроля высоты нижней границы облачности

располагается не на уровне земли, а на какой-либо высоте (например, на крыше здания). Данное значение автоматически добавляется к вычисленной высоте. По умолчанию равно нулю.

13. Окно с указанием интервала срабатывания программы обработки в автоматическом режиме в секундах. Минимальный интервал - 0,4 сек. По умолчанию программа запускается 1 раз в секунду (частота, с которой проводится обработка 1 Гц).
14. Окно «Опережение времени по Гринвичу». Доступно для чтения и записи. Устанавливается пользователем в начале работы в зависимости от его географического расположения. Применяется, так как имя входного файла представляет собой 14-значную последовательность цифр, в которых записаны дата и время создания файла. Первые четыре цифры – это год создания файла, две следующие – месяц, две следующие – день. Шесть следующих – время создания по Гринвичу (часы, минуты, секунды). По умолчанию равно +7. Формат имени файла – ГГГГММДДччммсс.
15. Окно вывода графика сигнала из атмосферы. В автоматическом режиме служит для визуального контроля и наблюдения. В ручном режиме служит для определения высоты облаков с помощью маркера. Процедура определения высоты облачности в ручном режиме описана далее.
16. Табло высоты облачности. Показывает высоту облаков для ближней (первое число) и для дальней зоны (второе число). При отсутствии облаков в какой-либо зоне появляется надпись «not».
17. Табло времени начала обработки. Указывает на время старта программы.
18. Табло текущего времени. Показывает текущее местное время.
20. Окно для указания места хранения выходной информации (высота или отсутствие облачности). Место хранения выходной информации может быть изменено (в том числе логический диск). Это можно сделать с помощью браузера (поз. № 25) или самостоятельно, вписав в окно директорию и путь к ней. Например, «D:\Height».

- 21.Окно для указания места хранения обработанных входных данных (архив). Место хранения обработанных данных может быть изменено (в том числе логический диск). Это можно сделать с помощью браузера (поз. № 24) или самостоятельно, вписав в окно директорию и путь к ней. Например, «D:\Archiv\».
- 22.Кнопка «ВЫХОД». Используется для принудительного завершения работы программы. При ее нажатии закрываются все открытые каналы, формы, программа прекращает свою работу, управление передается операционной системе.
- 23.Индикатор указателя процесса загрузки данных в динамическую память. После окончания загрузки становится возможным перевод курсора в область изображения для ручного определения высоты облаков.
- 24.Окно «Встроенный браузер». Служит контроля и качественного заполнения окон 21-22. Для этого выделите на браузере нужную директорию, щелкнув по ней, перенесите указатель мыши в нужное окно (21 или 22) и дважды щелкните. Выделенная на браузере директория скопируется в выбранное окно.
- 25.Окно графика наблюдения высоты облачности за 12 часов (720 значений с минутным интервалом наблюдений). Активно только в режиме автоматической обработки. При полном заполнении графика его изображение автоматически записывается в директорию хранения выходной информации (окно 21) в формате «bmp». При частичном заполнении выдается запрос на сохранение графика. Имя файла изображения начинается как «Рис-» и далее следует цифровая часть имени последнего входного файла для данного графика (14 цифр) в формате «bmp». Например: «Рис-20240318213618.bmp». Далее поле графика очищается, и он заполняется сначала.

4.4 Результаты работы программного комплекса

Информация о наличии или отсутствии облачности записывается также в файл, который обновляется после каждого сеанса. Фрагмент записи в текстовом файле представлен на рисунке 4.11, приведенной ниже.

ДАТА	ВРЕМЯ	ВЫСОТА ОБЛАКОВ	
		<300	>300
2021-11-05	00:00:17	not	1840
2021-11-05	00:00:43	not	2020
2021-11-05	00:01:09	not	1900
2021-11-05	00:01:36	not	1670
2021-11-05	00:01:45	not	1670
2021-11-05	00:02:11	not	1560
2021-11-05	00:02:37	not	2370
2021-11-05	00:02:46	not	not

Рисунок 4.11 – Фрагмент записи в текстовом файле

Кроме того, информация записывается в виде графика, который, по желанию оператора, после заполнения может быть записан в виде графического файла с расширением «.bmp». Пример записи приведен на рисунке 4.12.

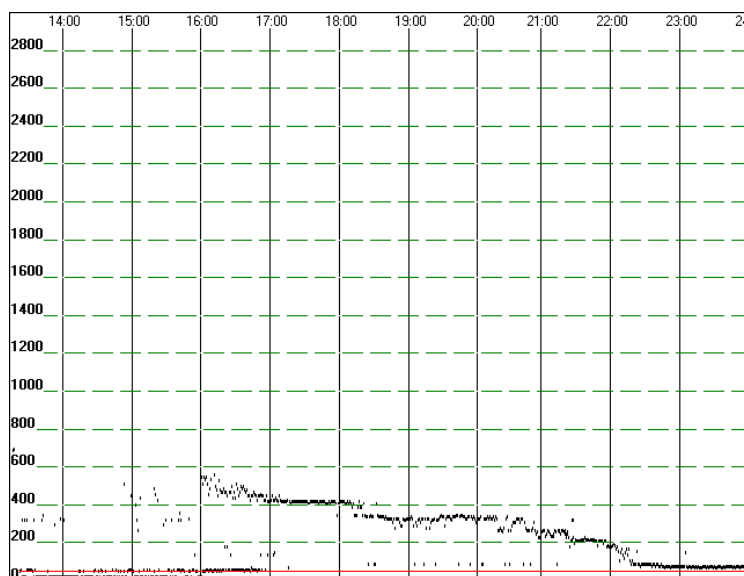


Рисунок 4.12 – Пример записи графического файла

Необходимо отметить, что при работе программного комплекса учитывается высота расположения прибора над уровнем земли и наклона по двум осям. Как отмечалось ранее, значение данных параметров вводится в соответствующих полях программы восстановления высоты нижней границы облачности.

4.5 Выводы

Таким образом, разработан программный комплекс обработки лидарных сигналов, который позволяет получать, непрерывно накапливать и сохранять лидарные данные с частотой дискретизации 20 МГц, а также восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности из полученных данных, с учётом наклона прибора, высоты над уровнем земли, при соотношении сигнал/шум больше 10. Программный комплекс позволяет регистрировать несколько слоёв облачности и сохранять полученные результаты в текстовом и графическом виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан прибор контроля высоты нижней границы облачности, построенный по биаксиальной оптической схеме, с безопасным для глаз инфракрасным лазерным диодом с импульсной мощностью на уровне 70 Вт, длительностью импульса 35 ± 5 нс, с центральной длиной волны близ 905 нм, позволяющий определять высоту нижней границы облачности с пространственным разрешением до 7,5 м в диапазоне от 15 м до 2000 м.

Предложено и создано схемное решение АЦП-ЦАП с замкнутой цифровой обратной связью для вычитания фоновой составляющей из сигнала лавинного фотодиода при применении оптического фильтра с полосой пропускания 25 нм, соотношении сигнал/фон более 0.00001, которое обеспечивает круглосуточное функционирование усилительного тракта без насыщения при использовании широкополосного оптического фильтра.

Установлено, что при использовании оптического фильтра шириной 25 нм и схемного решения уменьшения фона в сигнале, прибор функционирует при изменении уровня фона на 5 порядков.

Разработан программный комплекс обработки лидарных сигналов, который позволяет получать, непрерывно накапливать и сохранять лидарные данные с частотой дискретизации 20 МГц, а также восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности из полученных данных, с учётом наклона прибора, высоты над уровнем земли.

Показано, что метод определения высоты нижней границы облачности из лидарных сигналов, в котором за высоту нижней границы облачности принимается локальный максимум производной сигнала, превышающий пороговое значение, позволяет восстанавливать информацию о высоте нижней границы облачности до 3 слоев облачности при соотношении сигнал-шум больше 10.

Разработан способ и оптоволоконное устройство для калибровки созданного прибора контроля высоты нижней границы облачности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков, А. Инструктивный материал по теме “Метеоминимумы” / А. Беляков. — Текст : электронный // Учебно-тренировочный центр виртуальной авиации «Ростов» : [сайт]. — URL: https://training.urtv.ru/wp-content/uploads/2015/12/weather_minimums.pdf (дата обращения: 20.05.2024).
2. Рыбакова, Ж. В. Облака и их трансформация / Ж. В. Рыбакова. — Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. — 234 с. — Текст : непосредственный.
3. Григоров, Н. О. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. / Н. О. Григоров, А. Г. Саенко, К. Л. Восканян. — Санкт-Петербург : издательство РГГМУ, 2012. — 306 с. — Текст : непосредственный.
4. Мамонтова, Л. И. Метеорологический словарь / Л. И. Мамонтова, С.П Хромов. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. — 568 с. — Текст : непосредственный.
5. Шаманаев, В. С. Высота нижней границы облачности по результатам лазерного зондирования / В. С. Шаманаев. — Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — № 6. — С. 51-56.
6. Толмачева Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов): учеб. пособие / Толмачева, И. Н. — Пермь : Пермский университет, 2011. — 223 с. — Текст : непосредственный.
7. Тарасов, Л. В. Атмосфера нашей планеты / Л. В. Тарасов. — Москва : Д’АРТ, 2011. — 248 с. — Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры (с Изменением N 1). — Текст : электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» : [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009588> (дата обращения: 20.05.2024).
9. Frederick, Lutgens Atmosphere, The: An Introduction to Meteorology / Lutgens Frederick, Tarbuck Edward, Herman Redina. — London : Pearson, 2018. — 512 с. — Текст : непосредственный.

10. Vladimir, A. K. Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods / A. K. Vladimir, E. E. William. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. — 640 с. — Текст : непосредственный.
11. Атлас облаков / Д. П. Беспалов, А. М. Девяткин, Ю. А. Довгальчук [и др.]. — Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. — 248 с. — Текст : непосредственный.
12. Веселов, В. М. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. М. Веселов. — Текст : электронный // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных : [сайт]. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (дата обращения: 20.05.2024).
13. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам / О. А. Городецкий, Д. П. Беспалов, Е. А. Федорова [и др.]. — Ленинград : ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1985. — 297 с. — Текст : непосредственный.
14. Моргунов, В. Н. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений / В. Н. Моргунов, В. К. Моргунов. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. — 331 с. — Текст : непосредственный.
15. Кондратьев, К. Я. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности облаков / К. Я. Кондратьев, В.И.и Биненко. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. — 232 с. — Текст : непосредственный.
16. Cloud-radiative forcing and climate: results from the earth radiation budget experiment. / V. Ramanathan, R. D. Cess, E. F. Harrison [и др.]. — Текст : непосредственный // Science. — 1989. — № 243. — С. 57-63.
17. Глобальное потепление: Доклады Гринпис / Д. Леггетт, С. Шнайдер, Д. Вудуэлл [и др.]. — Москва : Издательство Московского университета, 1993. — 272 с. — Текст : непосредственный.
18. Коношонкин, А. В. Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах при лазерном зондировании : специальность 01.04.05 «Оптика» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Коношонкин, Александр Владимирович ; Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. — Томск, 2017. — 283 с. — Текст : непосредственный.

19. Петрянов-Соколов, И. В. Аэрозоли / И. В. Петрянов-Соколов, А. Г. Сутугин. — Москва : Наука, 1989. — 142 с. — Текст : непосредственный.
20. Илькун, Г. М. Загрязнение атмосферы и растения / Г. М. Илькун. — Киев : Наукова думка, 1978. — 147 с. — Текст : непосредственный.
21. Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) / М. В. Панченко, М. В. Кабанов, Ю. А. Пхалагов [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2019. — № 09. — С. 703-716.
22. Козлов, В. С. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе / В. С. Козлов, М. В. Панченко, Е. П. Яушева. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2010. — № 07. — С. 561-569.
23. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. — Москва : Мир, 1987. — 280 с. — Текст : непосредственный.
24. Лазерное и оптическое зондирование атмосферы / Г. Г. Матвиенко, П. А. Бабушкин, С. М. Бобровников [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2019. — № 9. — С. 726-740.
25. Pruppacher, H. R. Microphysics of Clouds and Precipitation / H. R. Pruppacher, J. D. Klett. — Dordrecht : Springer Dordrecht, 2010. — 954 с. — Текст : непосредственный.
26. Экспериментальное исследование отражения светового излучения от кристаллических частиц в нижней тропосфере / В. П. Галилейский, А. И. Гришин, А. И. Елизаров [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2022. — № 11. — С. 918–922.
27. Самохвалов, И. В. Лазерное зондирование атмосферы на основе явления аэрозольного рассеяния : специальность 01.04.05 «Оптика» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Самохвалов Игнатий Викторович ; Институт оптики атмосферы Сиб. отд-ния Акад. наук СССР. — Томск, 1981. — 436 с. — Текст : непосредственный.
28. Романовский, О. А. Лазерное зондирование атмосферы с использованием молекулярного поглощения : специальность 01.04.05 «Оптика» : диссертация

- на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Романовский, Олег Анатольевич ; Институт оптики атмосферы СО РАН. — Томск, 2012. — 236 с. — Текст : непосредственный.
29. Исследование органического аэрозоля растительного происхождения с помощью флуоресцентного лидара / А. И. Гришин, Г. М. Креков, М. М. Крекова [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — № 04. — С. 328-337.
 30. СКР-лидар для измерения температуры стратосферы / Д. А. Трифонов, С. М. Бобровников, В. И. Жарков, Е. В. Горлов. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс] : материалы XXIV Международного симпозиума, 2-5 июля 2018 года. — Томск : ИОА СО РАН, 2018. — С. 82-86.
 31. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г. Г. Матвиенко, Г. О. Задде, Э. С. Фердинандов, И. В. Самохвалов. — Новосибирск : Наука, 1985. — 223 с. — Текст : непосредственный.
 32. Разенков, И. А. Лидарные исследования пространственно-временной структуры аэрозольных полей в пограничном слое атмосферы : специальность 01.04.05 «Оптика» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Разенков Игорь Александрович ; Российская академия наук, Сибирское отделение, Томский филиал, Институт оптики атмосферы. — Томск, 1992. — 213 с. — Текст : непосредственный.
 33. Joshua, D, Vande A Novel Lidar Ceilometer / D, Vande Joshua. — Cham : Springer Cham, 2014. — 158 с. — Текст : непосредственный.
 34. Comparative analysis of the detectors in the laser ceilometer / Baranov Nikolay, Petrov Gleb, E. R. Galina [и др.]. — Текст : непосредственный // Conference: Advanced Sensor Systems and Applications XIII. — Beijing : SPIE, 2023. — С. 68.
 35. Коаксиальный лидар многократного рассеяния: распределение степени поляризации излучения в плоскости регистрации / И. В. Самохвалов, В. В. Брюханова, А. А. Дорошкевич, И. В. Животенюк. — Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика.. — 2012. — № 9. — С. 141-142.

36. Ландау, Л. Д. Рэлеевское рассеяние в газах и жидкостях / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Текст : непосредственный // Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. — Москва : Наука, 1982. — С. 582-583.
37. Mie, Gustav Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen / Gustav Mie. — Текст : непосредственный // Annalen der Physik. — Leipzig : б.н., 1908. — С. 377-445.
38. Кабанов, М. В. Деформация когерентных оптических импульсов при резонансном поглощении на наклонных атмосферных трассах / М. В. Кабанов, Ю. В. Кистенев, Ю. Н. Пономарев. — Текст : непосредственный // X Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере : тезисы докладов. — Томск : Академия, 1989. — С. 178.
39. Vaisala CL31 and CL51 ceilometers. — Текст : электронный // Vaisala : [сайт]. — URL: <https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/ceilometer-CL31-CL51-general-info> (дата обращения: 17.05.2024).
40. Гаврилов, В. А. Видимость в атмосфере / В. А. Гаврилов. — Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1966. — 324 с. — Текст : непосредственный.
41. Зуев, В. Е. Лазер – метеоролог / В. Е. Зуев. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. — 216 с. — Текст : непосредственный.
42. Анализ корректности восстановления вертикального распределения температуры атмосферы из лидарных сигналов молекулярного рассеяния на главном лидаре Сибирской лидарной станции / С. М. Бобровников, В. И. Жарков, Н. Г. Зайцев [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2022. — № 7. — С. 524-531.
43. Gimmestad, G. Reexamination of depolarization in lidar measurements / G. Gimmestad. — Текст : непосредственный // Applied Optics. — 2008. — № 47. — С. 3795-3802.
44. Vaisala| Ceilometer CL61 for Aviation. — Текст : электронный // Vaisala : [сайт]. — URL: <https://www.vaisala.com/en/products/ceilometer-CL61-aviation> (дата обращения: 17.05.2024).

45. Grishin, A. I. Methods of determining the height of the lower border of clouds from the lidar signal / A. I. Grishin, A. V. Kryuchkov, G. G. Matvienko. — Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 02–05 июля 2018 года. — Tomsk : SPIE, 2018. — С. 1083367.
46. Eberhard, W. L. Cloud signals from lidar and rotating beam ceilometer compared with pilot ceiling / W. L. Eberhard. — Текст : непосредственный // Atmospheric Oceanic Technology. — 1986. — № 3. — С. 499-512.
47. Pal, S. R. Automated method for lidar determination of cloudbase height and vertical extent / S. R. Pal, W. Steinbrecht, A. I. Carswell. — Текст : непосредственный // Apply Optics. — 1992. — № 10. — С. 1488-1494.
48. Automated detection of cloud and aerosol features with SACOL micro-pulse lidar in northwest China / Xie Hailing, Zhou Tian, Fu Qiang [и др.]. — Текст : непосредственный // Optics Express. — 2017. — № 25. — С. 732-753.
49. Aaron, J. P. Adapting the microspulse LIDAR for use as a reference for cloud measurement / J. P. Aaron. — Текст : электронный // 89th American Meteorological Society Annual Meeting : [сайт]. — URL: <https://ams.confex.com/ams/89annual/webprogram/Paper145041.html> (дата обращения: 20.05.2024).
50. Кауль, Б. В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: специальность 01.04.05 «Оптика»: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Кауль Бруно Валентинович ; ИОА СО РАН. — Томск, 2004. — 258 с. — Текст : непосредственный.
51. Зуев, В. Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В. Е. Зуев, М. В. Кабанов. — Москва : Советское радио, 1977. — 368 с. — Текст : непосредственный.
52. Klett, J. D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns / J. D. Klett. — Текст : непосредственный // Apply Optics. — 1981. — № 2. — С. 211-220.

53. Grishin, A. I. Lidar Observations of Atmospheric Optical Characteristics during Sichuan Earthquake / A. I. Grishin, A. V. Kryuchkov. — Текст : непосредственный // *Atmospheric and Oceanic Optics*. — 2018. — № 03. — С. 269-272.
54. Middleton, W. Vision Through the Atmosphere / W. Middleton. — Toronto : University of Toronto Press, 1952. — 250 с. — Текст : непосредственный.
55. Meteorological Services for International Air Navigation. — Текст : электронный // International Civil Aviation Organization : [сайт]. — URL: <https://www.icao.int/airnavigation/IMP/Documents/Annex%203%20-%2075.pdf> (дата обращения: 20.05.2024).
56. РД 52.21.680-2006 Руководство по определению дальности видимости ВПП (RVR) (с Поправкой N 1) . — Текст : электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» : [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048304> (дата обращения: 17.05.2024).
57. Joseph, P. S. Erbium laser ceilometer / P. S. Joseph. — Текст : электронный // Google Patents : [сайт]. — URL: <https://patents.google.com/patent/US3963347A/en> (дата обращения: 30.05.2024).
58. Розенберг, Г. В. Загрязнение атмосферы и растения / Г. В. Розенберг. — Прожекторный луч в атмосфере : Исследования по атмосферной оптике. — Москва : Академия наук СССР, 1960. — 244 с. — Текст : непосредственный.
59. Doc 9837. Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах. — Текст : электронный // Аэростандарт : [сайт]. — URL: <https://standart.aero/ru/icao/book/документ-9837-руководство-по-автоматическим-системам-метеорологического-наблюдения-на-ру-конс> (дата обращения: 20.05.2024).
60. Mixing-Height Time Series from Operational Ceilometer Aerosol-Layer Heights / Lotteraner, C., Piringer, M.. — Текст : непосредственный // *Boundary-Layer Meteorology*. — Berlin : Springer, 2016. — С. 265–287.

61. Волков, О. А. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 / О. А. Волков. — Текст : электронный // ИТМО : [сайт]. — URL: https://openbooks.itmo.ru/ru/read_article/9823/ (дата обращения: 20.05.2024).
62. Luca. Measurements with a CHM-15k ceilometer at the Alpine station of Aosta, Italy: first results and new insights on pollution dynamics / Magri, & D. Tiziana, & G. Henri [и др.]. — Текст : непосредственный // Diapason Project Final Conference. — Rome : ARPA, 2015. — С. 141. / Luca.
63. An Automated Common Algorithm for Planetary Boundary Layer Retrievals Using Aerosol Lidars in Support of the U.S. EPA Photochemical Assessment Monitoring Stations Program / Caicedo, V., Delgado [и др.]. — Текст : непосредственный // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. — 2020. — № 10. — С. 1847-1864.
64. Continuous and automatic measurements of atmospheric structures and aerosols optical properties with the R-MAN510 nitrogen Raman lidar Super Ceilometer / Royer. — Текст : электронный // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/265087771_Continuous_and_automatic_measurements_of_atmospheric_structures_and_aerosols_optical_properties_with_the_R-MAN510_nitrogen_Raman_lidar_Super_Ceilometer (дата обращения: 20.05.2024).
65. Continuous and automatic measurements of atmospheric structures and aerosols optical properties with the R-MAN510 nitrogen Raman lidar Super Ceilometer / Royer. — Текст : электронный // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/265087771_Continuous_and_automatic_measurements_of_atmospheric_structures_and_aerosols_optical_properties_with_the_R-MAN510_nitrogen_Raman_lidar_Super_Ceilometer (дата обращения: 20.05.2024).
66. Облакомер: дотянуться до облаков. — Текст : электронный // РОСТЕХ : [сайт]. — URL: <https://rostec.ru/news/oblakomer-dotyanutsya-do-oblakov/> (дата обращения: 20.05.2024).

67. Датчик высоты облаков ДВО-3Л. — Текст : электронный // АО «Лыткаринский завод оптического стекла» : [сайт]. — URL: <https://www.lzos.ru/products/meteorologicheskie-pribory/datchik-vysoty-oblakov-dvo-3l/> (дата обращения: 20.05.2024).
68. Бочарников, Н. В. Метеорологическое оборудование аэродромов и его эксплуатация / Н. В. Бочарников, А. С. Солонин, Г. Б. Брылев. — СПб : Гидрометеиздат, 2003. — 591 с. — Текст : непосредственный.
69. Измеритель высоты облаков ДВО-2. — Текст : электронный // Общество с ограниченной ответственностью «Экспериментально-производственные мастерские гидрометеорологического и геофизического оборудования» : [сайт]. — URL: <https://epmggo.com/product/izmeritel-dvo-2> (дата обращения: 20.05.2024).
70. Веретенников, В. В. Геометрический фактор лидара в малоугловом приближении / В. В. Веретенников. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 1998. — № 09. — С. 1002-1007.
71. Медведев, А. Развитие принципов построения однозрачковых систем со встроенным лазерным дальномером / А. Медведев, А. Гринкевич, С. Князева. — Текст : непосредственный // Фотоника. — 2015. — № 1. — С. 112 - 123.
72. Агишев, Р. Р. Лидарный мониторинг атмосферы / Р. Р. Агишев. — Москва : ФизМатЛит, 2009. — 310 с. — Текст : непосредственный.
73. Исследование органического аэрозоля растительного происхождения с помощью флуоресцентного лидара / А. И. Гришин, Г. М. Креков, М. М. Крекова [и др.]. — Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — № 04. — С. 328-337.
74. Привалов, В. Уравнение лазерного зондирования для реального аэрозольного лидара / В. Привалов, В. Шеманин. — Текст : непосредственный // Фотоника. — 2013. — № 2. — С. 72-78.
75. Федеральный закон от 26.06.2008 N 102-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «Об обеспечении единства измерений» (с изм. и доп., вступ. в силу с 29.12.2021). — Текст : электронный // Электронный фонд нормативно-технической и

- нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»: [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902107146> (дата обращения: 17.05.2024).
76. Kryuchkov, A. V. Calibration and verification portable ceilometer / A. V. Kryuchkov, A. I. Grishin. — Текст : непосредственный // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 22–26 июня 2015 года. Vol. 9680. — Tomsk : SPIE, 2015. — С. 96804.
77. Спецификация и руководство по внедрению MODBUS по последовательной линии. — Текст : электронный // Modbus : [сайт]. — URL: https://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_01.pdf (дата обращения: 20.05.2024).
78. MODBUS application protocol specification V1.1b . — Текст : электронный // Modbus : [сайт]. — URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf (дата обращения: 20.05.2024).
79. Python Serial Port Extension. — Текст : электронный // pyserial 3.5 : [сайт]. — URL: <https://pypi.org/project/pyserial/> (дата обращения: 20.05.2024).
80. A Python Modbus Stack. — Текст : электронный // PyModbus : [сайт]. — URL: <https://pymodbus.readthedocs.io/en/latest/source/readme.html> (дата обращения: 20.05.2024).
81. Зуев, В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере / В. Е. Зуев. — Москва : Радио и связь, 1981. — 287 с. — Текст : непосредственный.
82. Орлов, В. М. Сигналы и помехи в лазерной локации / В. М. Орлов. — Москва : Радио и связь, 1985. — 264 с. — Текст : непосредственный.
83. Росс, М. Лазерные приемники / М. Росс. — Москва : Мир, 1969. — 519 с. — Текст : непосредственный.
84. Пространственная изменчивость характеристик атмосферы аэрозоля / Б. Д. Белан, А. И. Гришин, Г. Г. Матвиенко, И. В. Самохвалов. — Новосибирск : Наука, 1989. — 152 с. — Текст : непосредственный.
85. Рождествин, В. Н. Основы импульсно лазерной локации / В. Н. Рождествин. — Москва : Изд. МГТУ им. Баумана, 2010. — 573 с. — Текст : непосредственный.

86. Абергауз, Г. Г. Справочник по вероятностным расчетам / Г. Г. Абергауз, А. П. Тронь. — Москва : Ордена Трудового красного знамени Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. — 328 с. — Текст : непосредственный.
87. Рабинер, Л. Р. Теория и применение цифровой обработки сигналов. / Л. Р. Рабинер, В. М. Гоулд. — Москва : Мир, 1978. — 589 с. — Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

Страна	Марка	Габариты, мм	Диапазон измерений, м	Излучатель	Масса, кг	Класс защитного исполнения	Автоматический обдув/обогрев окна	Безопасность для глаз
Финляндия	CL31	1190×335×325	0-7500	910 нм	32	IP65	есть	Класс 1М
Германия	CHM 15k „NIMBUS“	500×500×1550	5-15000	Nd: YAG, 1064 нм	70	IP65	есть	Класс 1М
Велико-британия	SkyVUE 8	737×294×240	0-8000	InGaAs 912 нм	18	IP65	есть	Класс 1М
Франция	R-Man 510	1150×800×650	15-15000	Nd:YAG 355 нм	105	IP65	есть	-
СССР	ДВО-2	610×570×600	15-2000	импульсная лампа	70×2 + 9	IP65	-	-
Германия	CBME80	468×408×234	0-7500	-	15	IP65	есть	Класс 1М
РФ	SKYDEX	860 × Ø530	0-7500	1535 нм	30	IP65	есть	-
США	CS135	1000×330×316	0-10000	912 нм (±5 нм)	32	IP66	есть	Класс 1М
РФ	Разработанный 1Б69М	560×150×420	15-2000	905 нм	13,2	IP65	есть	Класс 1М

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ
И ПАТЕНТЫ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022660055

**Программа определения высоты нижней границы
облачности из лидарных сигналов, полученных от
измерителя параметров облаков (ИПО)**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е.
Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА
СО РАН) (RU)*

Авторы: *Гришин Анатолий Иванович (RU), Крючков Александр
Владимирович (RU), Филатов Виктор Владимирович (RU)*

Заявка № **2022619033**

Дата поступления **20 мая 2022 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **30 мая 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Zubov

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022660475

**Программа обработки лидарных сигналов измерителя
параметров облаков (ИПО)**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт оптики атмосферы им.
В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии
наук (ИОА СО РАН) (RU)*

Авторы: *Гришин Анатолий Иванович (RU), Крючков
Александр Владимирович (RU), Филатов Виктор
Владимирович (RU)*

Заявка № 2022619040

Дата поступления 20 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022660476

**Программа для сбора, конвертации и архивирования
данных от измерителя параметров облаков (ИПО)**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт оптики атмосферы им.
В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии
наук (ИОА СО РАН) (RU)*

Авторы: *Гришин Анатолий Иванович (RU), Крючков
Александр Владимирович (RU), Филатов Виктор
Владимирович (RU)*

Заявка № 2022619151

Дата поступления 20 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 187227

Измеритель параметров облаков с оптоволоконным
приёмопередающим трактом

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) (RU)*

Авторы: *Крючков Александр Владимирович (RU), Гришин Анатолий Иванович (RU), Матвиенко Геннадий Григорьевич (RU)*

Заявка № 2018122155

Приоритет полезной модели 15 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 25 февраля 2019 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 15 июня 2028 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 187812

Измеритель параметров облаков с совмещенной
передающей системой

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) (RU)*

Авторы: *Крючков Александр Владимирович (RU), Гришин Анатолий Иванович (RU), Матвиенко Геннадий Григорьевич (RU)*

Заявка № 2018143769

Приоритет полезной модели 10 декабря 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 19 марта 2019 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 10 декабря 2028 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

К О Н Ц Е Р Н В К О " А Л М А З - А Н Т Е Й "

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
УРАЛЬСКОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ВЕКТОР

Россия, 620078, г. Екатеринбург,
ул. Гагарина, 28
ИНН/КПП 6670012517/667001001

Тел.: (343) 375-42-20, 374-04-33
Факс: (343) 374-15-91, 369-50-09
ОКПО/ОГРН/ОГРНИП 07556226/1026604961129

E-mail: vektor@vektor.ru
Сайт: www.vektor.ru

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «УПП «Вектор»

В.А. Немтинов

2024 г.

« _____ »



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Крючкова Александра Владимировича

Комиссия в составе:

председатель Пономарев О.П., заместитель генерального директора
по НТР- главный конструктор;

члены комиссии: Ращупкин Д.А., начальник отдела;
Долганов С.В., начальник отдела;
Шейников Н.В., начальник сектора

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Крючкова А.В. «Лидарный программно-аппаратный комплекс контроля высоты нижней границы облачности с безопасной для глаз интенсивностью излучения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в опытно-конструкторской деятельности АО «УПП «Вектор» при разработке макета измерителя параметров облаков (ИПО) в виде:

1. Методики юстировки оптического тракта ИПО;
2. Технических предложений по структуре и режимам функционирования ИПО.

Председатель комиссии О.П. Пономарев

Члены комиссии: Д.А. Ращупкин

С.В. Долганов

Н.В. Шейников

Исполнено _____ В дело № _____
иск. №, дата подпись