

БАЛТИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

На правах рукописи

Пенкин Михаил Сергеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ГЕТЕРОДИННОГО
СИГНАЛА ВЕТРОВОГО ЛИДАРНОГО ПРОФИЛОМЕТРА
СИСТЕМЫ МЕТЕООБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ**

**Специальность 25.00.30 –
"Метеорология, климатология, агрометеорология"**

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
В.Р.Ахметьянов

Санкт-Петербург - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ ветровых лидарных профилометров с непрерывным когерентным излучением.....	16
1.1. Ветер как важнейший авиационный метеопараметр приземного слоя тропосферы.....	16
1.2. Физические основы измерения ветровых характеристик атмосферы лидарными профилометрами.....	26
1.3. Сравнительный анализ лидарных профилометров с другими датчиками скорости ветра.....	35
Выводы по 1 главе.....	48
Глава 2. Информационное обеспечение ветрового лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием.....	50
2.1. Структура информационного обеспечения ветрового лидарного профилометра.....	50
2.2. Математическая модель измерительного процесса ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра.....	55
Выводы по 2 главе.....	70
Глава 3. Методы и алгоритмы обработки сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием.....	73
3.1. Выделение полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном.....	73
3.2. Методы определения центральной доплеровской частоты.....	79

3.3. Метод определения полного вектора скорости ветра.	85
Выводы по 3 главе.....	92
Глава 4. Обработка экспериментальных данных ветрового лидарного профилометра и рекомендации по совершенствованию его применения.....	94
4.1. Описание ветрового лидарного профилометра.....	94
4.2. Система управления и сбора данных.....	103
4.3. Программно-алгоритмическое обеспечение ветрового лидарного профилометра в системе метеобеспечения и обработка экспериментальных данных.....	107
4.4. Рекомендации по совершенствованию применения ветрового лидарного профилометра в системе метеобеспечения и результаты его использования для мониторинга вихревых следов	116
Выводы по 4 главе.....	126
Заключение.....	128
Список литературы.....	135

Введение

Растущий поток пассажирских и грузовых перевозок на региональных и трансконтинентальных направлениях, как в России, так и за рубежом [1] является основой для существенного увеличения парка воздушных судов самого различного типа и назначения.

Предполагается, что средний темп роста пассажирских перевозок до 2030 гг. будет достигать 7,5-8,5% в год. Сохранение стратегических инновационных приоритетов развития экономики России обуславливает стабильность долговременных целей развития воздушного транспорта. Пассажирооборот российских авиакомпаний может составить 290-360 млрд. пассажирокилометров (пкм) в 2020 году, а к 2030 году достигнуть 510-625 млрд. пкм. Приведенные показатели обусловлены, в том числе выходом российских авиакомпаний на новый рынок транзитных авиаперевозок через территорию России. Оптимистичный вариант прогноза предполагает сохранение в ближайшие годы высоких темпов роста спроса на авиаперевозки (на уровне 7-10% в год). Средний темп роста авиаперевозок до 2030 гг. прогнозируется на уровне 6,1 - 8,0% в год.

Что касается грузовых перевозок, то они имеют значительный потенциал роста за счет дальнейшего расширения участия российских авиакомпаний в мировом рынке перевозок транзитных и уникальных грузов. Росту спроса на грузовые авиаперевозки также будет способствовать переход российской экономики на инновационный путь развития. В целом ожидается рост грузооборота российских авиакомпаний к 2020 году до 7-10 млрд. тоннокилометров (ткм), а к 2030 году до 12-18 млрд. ткм.

Отметим, что технические характеристики современных пассажирских самолетов просто впечатляют. Высота самого большого в мире пассажирского самолета **Airbus A380** — 24 метра, длина и размах крыла достигают почти 80 метров. На 2-х палубах в салоне трёх классов свободно размещаются 525 пассажиров, а в одноклассовой конфигурации — 853 пассажира! Дальность

беспосадочного перелёта при нормальных метеоусловиях составляет около 15400 км, а максимальная взлётная масса самолета — 560 тонн.

На современном этапе развития воздушного транспорта остро должен ставиться вопрос об авиационной безопасности. В комплексе проблем инновационного развития Российской Федерации важное место занимают инновационные решения в системе обеспечения авиационной безопасности, построенной на основе мировых стандартов и, прежде всего, практики и рекомендаций Международной организации ИКАО. С 1995 по 2012 год общие потери государственной авиации составили более 420 воздушных судов, при этом погибло более тысячи человек. Относительный показатель, а именно число авиационных происшествий на 100 тыс. часов налета в РФ в течение 30 лет находится на уровне 4-5 авиационных происшествий на 100 тыс. часов налета, в то время как в ведущих авиационных державах этот показатель в 2 и более раза ниже [22]. Решение проблемы безопасности полета воздушных судов во многом определяется корректностью учета целой совокупности различных факторов и в том числе метеоусловий, как на трассе полета, так и в зонах аэропортов взлета и посадки. По состоянию на 2009 год [23] статистические данные ИКАО свидетельствуют о том, что за последние 25 лет около 20% авиационных происшествий были связаны с неблагоприятными метеоусловиями. В 30% случаев они явились косвенными или сопутствующими причинами таких происшествий. Уровень безопасности полетов в горных районах (на горных авиатрассах и на аэродромах) значительно ниже по сравнению с равнинными районами (аэродромами). Количество авиационных происшествий в горных районах составляет порядка 16% по сравнению со всеми авиационными происшествиями, связанными с метеоусловиями. Количество авиационных происшествий при посадке в 2-3 раза больше по сравнению с их количеством на других этапах полета.

В связи с повсеместным повышением интенсивности воздушных перевозок наряду с такими опасными ветровыми метеорологическими

явлениями, как турбулентность, струйные течения, вихревые следы самолетов [97-102], безусловно, следует рассматривать, исследовать и определять сдвиг ветра в приземном слое атмосферы, особенно в зоне взлетно-посадочной полосы (ВПП), как при взлете, так и при посадке воздушного судна [2].

В основе определения сдвига ветра лежит оперативный высокоточный мониторинг текущей ветровой обстановки, в частности величины и направления скорости ветра, а также степени турбулентности в зоне контроля воздушного пространства [3-5, 97]. В настоящее время для определения параметров скорости ветра широкое распространение получили такие локальные или контактные датчики, как чашечные, винтовые, крыльчатые, акустические и другие анемометры, устанавливаемые на высотных строениях либо метеорологических мачтах [6]. Основным недостатком локальных датчиков заключается в невозможности их установки в необходимых точках измерения, например на большой высоте, или над ВПП. С целью преодоления этого недостатка для определения параметров структуры поля скоростей ветра в удаленных областях воздушного пространства все большее распространение получают системы дистанционного зондирования. Они характеризуются высокой оперативностью, информативностью и точностью.

Все дистанционные методы определения параметров скорости ветра можно разделить на четыре класса [7]: радиолокационные, акустические, радиоакустические и лидарные. В соответствии с необходимостью определения параметров сдвига ветра в приземном слое атмосферы в зоне ВПП на высотах в диапазоне 5-500 метров перспективным рассматривается лидарный метод [2]. В случае оптического диапазона удается сделать приёмно-передающую аппаратуру лидара малогабаритной по сравнению с аналогичными радиотехническими и акустическими средствами [8].

По принципу действия лидарные системы могут быть корреляционными [9, 10, 11, 12] и доплеровскими [13, 14, 15, 16]. Корреляционный метод основан на анализе пространственно-временной структуры поля флуктуаций

регистрируемого лазерного сигнала, вызванных естественной неоднородностью оптических параметров пространственно-разнесенных рассеивающих объёмов. В доплеровском методе для измерения скорости ветра используется явление доплеровского сдвига частоты зондирующего лазерного излучения при его рассеянии атмосферным аэрозолем, увлекаемым ветровым потоком. По доплеровскому сдвигу частоты регистрируемого сигнала обратного рассеяния определяется радиальная составляющая вектора скорости ветра. В доплеровском методе по сравнению с корреляционным требуется более сложная аппаратная реализация, но при этом достигается существенно большая точность [18, 19].

Традиционные методы дистанционного получения профиля ветра в атмосфере с помощью доплеровских лидаров основаны на использовании когерентного импульсного или непрерывного [13, 14, 16, 20, 96] излучения. Несмотря на то, что дальность измерений импульсных систем достигает 10-20 км, их недостатком является наличие «мертвой зоны», которая нередко составляет десятки и даже сотни метров. В то же время ветровые лидары или лидарные профилометры с непрерывным когерентным излучением имеют диапазон рабочих дальностей от единиц до нескольких сотен метров и характеризуются приемлемыми массо-габаритными параметрами.

Отметим, что наиболее резкие изменения ветровых характеристик атмосферы, включая сдвиг ветра, наблюдаются в приземном слое тропосферы, толщина которого достигает 600 метров [21]. В связи с этим лидарный профилометр с непрерывным когерентным излучением представляется одним из дистанционных датчиков, в наибольшей степени соответствующим задаче оперативного мониторинга сдвига ветра в зоне ВПП в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

Большой вклад в решение проблем разработки и эксплуатации когерентных оптико-электронных систем внесли ученые и инженеры России, Германии, Франции и США. Основные результаты в этом направлении

изложены в работах Банаха В.А., Борейшо А.С., Зуева В.В., Зуева В.Е., Стерлядкина В.В., Филатова Ю.В., Матвиенко Г.Г., Смалихо И.Н., Каневского М.И., Баранова Н.А., Шарова С.Н., Гордиенко В.М., Путивского Ю.Я., Вернера Х., Вергена В., Кресса А., Лайке И., Штрайхера Ю., Хендерсона С., Хэннона С., Хуффакера Р., Мензиса Р., Билбро Дж. и других.

Точная и своевременная информация о ветровом поле в приземном слое атмосферы позволяет повысить безопасность полетов летательных аппаратов и снизить процент аварий и катастроф. В настоящее время особый интерес вызывают проблемы, связанные с обеспечением безопасности полетов воздушных лайнеров на таких ответственных этапах, как взлет и посадка, во время совершения которых летательный аппарат наиболее уязвим. В этот момент он имеет малую скорость и находится в непосредственной близости от земли. При этом наиболее важной является информация о ветровом поле приземного слоя атмосферы (на высотах до 150 м). По этим причинам особую актуальность приобретает разработка современных, простых в обслуживании, надежных и компактных ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров непрерывного типа с коническим сканированием. Профилометры указанного типа в настоящее время являются практически единственным средством, позволяющим осуществлять мониторинг ветровой обстановки и, в частности, таких опасных явлений, как сдвиг ветра и вихревые следы самолетов, на высотах от 3 до 300 метров.

В то же время несмотря на достигнутые успехи до сих пор не получили должного развития вопросы, связанные с разработкой информационного обеспечения ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров с коническим сканированием. Применение сложных и перспективных методов обработки сигналов ветровых лидаров ранее ограничивалось недостатком вычислительных мощностей. Однако постоянное развитие компьютерных технологий, как на аппаратном, так и программном уровнях, позволяет применять все более сложные методы обработки сигналов, в том числе в

реальном масштабе времени. В результате появляется возможность вывести структуру, состав и характеристики информационного обеспечения ветровых лидаров, а также и его программно-алгоритмической части на качественно новый уровень, и тем самым повысить степень авиационной безопасности.

Наличие отмеченных выше факторов делает задачу обоснования, разработки и исследования новых эффективных методов и алгоритмов обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров непрерывного типа с коническим сканированием весьма актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка математической модели измерительного процесса, состава и структуры программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием в системе метеорологического сопровождения авиационной безопасности.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи:**

1. Анализ средств мониторинга ветровой обстановки в зоне аэропортов в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности воздушных судов на этапах их взлета и посадки с целью выявления преимуществ и недостатков существующих комплексов.

2. Теоретическое исследование с целью обоснования выбора математической модели локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием.

3. Разработка и исследование методов, алгоритмов и программ обработки сигналов, регистрируемых когерентным доплеровским лидарным профилометром непрерывного типа с коническим сканированием, для получения оценки скорости ветра.

4. Проверка эффективности разработанных методов и алгоритмов обработки экспериментальных реализаций сигналов.

Научная новизна состоит в том, что **впервые**:

1. Предложена модель локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием в приземном слое атмосферы, которая учитывает неравномерность спектрального фона.

2. В соответствии с предложенной моделью локационного сигнала разработана методика обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием с целью определения сдвига ветра на заданных высотах для использования в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

3. Для обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием на этапе выделения неравномерного спектрального фона использован метод деления разрядной сетки, основанный на одновременном подавлении импульсных помех и аддитивного шума. Данный метод позволяет осуществить вместо последовательной параллельную обработку и тем самым обеспечить повышение быстродействия алгоритма на время, требуемое для подавления отдельно импульсных помех, либо аддитивных шумов.

4. Показано, что разработанное математическое обеспечение в составе ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием является подсистемой информационного обеспечения.

5. Впервые в России проведены измерения вихревого следа самолета Боинг 737-800 в районе аэропорта Пулково с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000. Полученные материалы позволяют усовершенствовать математические модели образования вихревых следов летательных аппаратов в приземном слое

атмосферы, а также исследовать динамику их развития и тем самым сформулировать рекомендации по обеспечению требуемого уровня авиационной безопасности.

Достоверность результатов работы обеспечивается следующими утверждениями:

1. Полученные результаты согласуются с теоретическими расчетами и результатами, описанными в литературе;

2. Разработанные методики проверены на практике;

3. Проверка диапазона и погрешности измерения ветровым когерентным доплеровским лидарным профилометром непрерывного типа с коническим сканированием скорости и направления ветра на высотах от 3 м до 300 м с задаваемой кратностью (10 -100 м) произведена в процессе сертификационных испытаний на базе измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун». На основании проведенных испытаний Комиссией МАК по сертификации аэродромов и оборудования на профилометр ПЛВ-300 выдан сертификат типа оборудования № 544.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанные математическая модель измерительного процесса и программно-алгоритмическое обеспечение ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа в системе метеорологического сопровождения авиационной безопасности, направленные на решение задачи формирования оперативных сведений о сдвиге ветра и вихревом следе самолета в приземном слое атмосферы в зоне взлетно-посадочной полосы аэродрома, позволяют повысить эффективность принятия решений авиадиспетчерами командно-диспетчерского пункта аэропорта.

Использование результатов диссертации

Положения, разработки и научно-практические рекомендации диссертации по использованию математической модели измерительного процесса и

программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием в системе метеорологического сопровождения авиационной безопасности внедрены в ООО «НПП «Лазерные системы» при создании профилометра лидарного ветрового ПЛВ-300 с монитором оператора, в разработке и испытаниях как аппаратной части, так и информационного обеспечения которого автор принимал непосредственное участие, а также методы, алгоритмы и методика обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра использованы при разработке требований к составу и облику комплекса средств фундаментального обеспечения глобальной навигационной системы ГЛОНАСС в Акционерном обществе «Институт прикладной астрономии».

Результаты диссертационной работы используются также в учебной и научной работе кафедры И1 БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф.Устинова.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач были использованы методы математического моделирования процессов и систем; методы теории оптико-электронных систем; методы теории атмосферной оптики; методы теории автоматизированной обработки сигналов и полей; математический аппарат теории вероятностей и математической статистики. В ходе экспериментальных исследований применялись методы планирования эксперимента, статистической обработки данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение модели локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием.

2. Методика обработки локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием.

3. Для обработки спектра локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием предложено использовать метод деления разрядной сетки при одновременном подавлении импульсных помех и аддитивного шума.

4. Структура программно-алгоритмического обеспечения системы обработки локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием.

5. Результаты измерения вихревого следа самолета Боинг 737-800 в приземном слое атмосферы с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 5 международных, в том числе на 13-ой и 14-ой международных научно-практических конференциях “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике”, (г. СПб, 24-26 мая и 4-5 декабря 2012 г.); Международной научной конференции “Лазеры. Измерения. Информация.”, (г. СПб, 5-7 июня 2012 г.); “15th International Conference on Laser Optics (LO - 2012)”, (St.Petersburg, Russia, June, 25-29, 2012.); Юбилейной XIII Санкт-Петербургской международной конференции “Региональная информатика (РИ–2012)”, (г. СПб, 24 – 26 октября 2012 г.); а также на заседании «Состояние и перспективы лазерной локации атмосферы и подстилающей поверхности» постоянно действующего семинара «Дистанционные методы зондирования природной среды» (г. СПб, ВКА им. А.Ф.Можайского, 16 мая 2013 г.).

По теме диссертационной работы опубликовано 12 работ, включая три статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, четыре статьи в отраслевых журналах и 5 работ в материалах международных научно-технических конференций.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе рассматривается совокупность и характер атмосферных ветровых метеоявлений с точки зрения обеспечения авиационной безопасности в аэропортах на этапах взлета и посадки воздушных судов. Отмечается высокая опасность такого метеоявления, как сдвиг ветра, и необходимость его постоянного мониторинга. Рассмотрены физические основы измерения скорости ветра. Проведен обзор и сравнительный анализ лидарных профилометров с другими датчиками скорости ветра. Сделан вывод, что огромные возможности по улучшению тактико-технических характеристик ветровых лидарных профилометров заключены в направлении, связанном с разработкой и совершенствованием такой составной части его информационного обеспечения, как программно-алгоритмическая часть.

Во второй главе рассмотрены вопросы использования данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра в информационном метеорологическом обеспечении контрольно-диспетчерского пункта аэропорта на основе принципов ситуационного управления. Построена математическая модель сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием в предположении, что за время сканирования ветровые характеристики атмосферы существенно не изменяются, а также разработана общая схема алгоритма обработки лидарного сигнала.

Третья глава посвящена вопросам, связанным с обработкой сигнала ветрового доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием. Для выделения цифрового искаженного шумами и помехами колоколообразного полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном предложен метод деления разрядной сетки.

Четвертая глава содержит описание ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием ПЛВ-300, системы управления и сбора данных, программно-

алгоритмического обеспечения и результаты обработки экспериментальных данных. Для эффективного решения задач авиационной безопасности на этапах взлета и посадки воздушных судов с целью оперативного мониторинга ветровой обстановки в приземном слое атмосферы на высотах от 3 до 1000 и более метров приведено обоснование рекомендаций по совершенствованию применения ветровых лидарных профилометров как непрерывного, так и импульсного типа. В результате проведения экспериментальных исследований впервые в России осуществлены измерения вихревых следов ряда самолетов в аэропорту Пулково с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000, в информационном обеспечении которого использованы разработанные автором методы и алгоритмы обработки данных ПЛВ-300. Полученные материалы позволяют усовершенствовать математические модели образования вихревых следов летательных аппаратов в приземном слое атмосферы, а также исследовать динамику их развития и тем самым сформулировать рекомендации по обеспечению требуемого уровня авиационной безопасности.

В заключении перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертации, и намечены пути дальнейшего развития исследований.

Автор выражает глубокую благодарность коллективу НПП «Лазерные системы» за предоставленные материалы и заведующему кафедрой И1 «Лазерная техника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф.Устинова доктору технических наук профессору А.С. Борейшо за постоянную поддержку при проведении диссертационного исследования.

1 АНАЛИЗ ВЕТРОВЫХ ЛИДАРНЫХ ПРОФИЛОМЕТРОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ КОГЕРЕНТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

1.1 Ветер как важнейший авиационный метеопараметр приземного слоя тропосферы

Атмосферный воздух практически никогда не находится в состоянии покоя. Огромные массы воздуха перемещаются из одного района в другой и на очень значительные расстояния. Явление перемещения атмосферного воздуха по отношению к земной поверхности называется ветром. Непосредственной причиной возникновения ветра является неравномерное распределение давления по горизонтали. Как только создается разность атмосферного давления в горизонтальном направлении, то в тот же момент возникает сила барического градиента, под действием которой частицы воздуха начинают перемещаться с ускорением из области более высокого в область более низкого давления. Эта сила всегда направлена перпендикулярно по нормали к изобаре в сторону низкого давления. При этом необходимо учитывать вращение Земли и трение о земную поверхность. В случае, если влияние силы трения о земную поверхность незначительно либо отсутствует, то такой ветер называется градиентным. Весь ветер выше 1000-1500 метров практически всегда является градиентным [21]. Ветры, которые обусловлены в первую очередь неравномерным нагревом земной поверхности, называются местными и присутствуют до высот в 1500 метров. К местным ветрам относятся бризы, горно-долинные ветры, бора, афганец и т. п.

Практически во всех известных публикациях, а также в соответствии с ГОСТ-26883-86 среди климатических внешних воздействующих факторов термин ветер определяется, как поток воздуха, движущийся с определенной скоростью. Наряду с величиной скорости ветер характеризуется направлением и силой. Ветру свойственны порывистость скорости и

изменчивость направления. Шкала для определения скорости, силы и названия ветра или иначе шкала Бофорта [24] приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Шкала Бофорта для определения силы ветра

Баллы	Визуальные признаки на суше	Скорость ветра, км/ч	Скорость ветра, м/с	Термины, определяющие силу ветра
0	Спокойно; дым поднимается вертикально	Менее 1,6	Менее 0,4	Штиль
1	Направление ветра заметно по отклонению дыма, но не по флюгеру	1,6 – 4,8	0,4 – 1,3	Тихий
2	Ветер ощущается кожей лица; шелестят листья; поворачиваются обычные флюгеры	6,4 – 11,2	1,7 – 3,1	Лёгкий
3	Листья и мелкие веточки находятся в постоянном движении; развеваются лёгкие флаги	12,8 – 19,2	3,5 – 5,3	Слабый
4	Ветер поднимает пыль и бумажки; раскачиваются тонкие ветви	20,8 – 28,8	5,7 – 8	Умеренный
5	Качаются покрытые листвой деревья; появляется рябь на водоёмах суши	30,4 – 38,4	8,4 – 10,6	Свежий
6	Качаются толстые ветви; слышен свист ветра в электропроводах; трудно удерживать зонт	40,0 – 49,6	11,1 – 13,7	Сильный
7	Качаются стволы деревьев; трудно идти против ветра	51,2 – 60,8	14,2 – 16,8	Крепкий
8	Ломаются ветви деревьев; практически невозможно идти против ветра	62,4 – 73,6	17,3 – 20,4	Очень крепкий
9	Небольшие повреждения; ветер срывает дымовые колпаки и черепицу с крыш	75,2 – 86,4	20,8 – 24	Шторм
10	На суше бывает редко. Деревья выворачиваются с корнями. Значительные разрушения строений.	88,0 – 100,8	24,4 – 28	Сильный шторм
11	На суше бывает очень редко. Сопровождается разрушениями на большом пространстве.	102,4 – 115,2	28,4 – 32	Жестокий шторм
12	Сильные разрушения (баллы 13 – 17 были добавлены Бюро Погоды США в 1955 и применяются в шкалах США и Великобритании)	116,8 – 131,2	32,4 – 36,4	Ураган
13		132,8 – 147,2	36,8 – 40,9	
14		148,8 – 164,8	41,3 – 45,8	
15		166,4 – 182,4	46,2 – 50,7	
16		184,0 – 200,0	51,1 – 55,6	
17		201,6 – 217,	56 – 60,3	

Вопросам циркуляции воздушных масс в атмосфере и в каждом из ее составляющих посвящено огромное количество различных работ. По физическим свойствам и, в первую очередь, по характеру распределения температуры воздуха с высотой, атмосфера делится на такие ее части, как тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера и экзосфера. Отметим, что основная часть авиационных перевозок осуществляются в тропосфере, которая простирается от земной поверхности до высот в 10-12 км в умеренных широтах. У полюсов верхняя граница тропосферы ниже, а у экватора – выше. Определенная часть трасс полета воздушных судов приходится на тропопаузу, толщина которой по высоте варьируется от нескольких сот метров до 1-2 км, а также на нижнюю часть стратосферы.

Тропосфера, в которой различаются три слоя, характеризуется тем, что в ней:

- сосредоточено 79 процентов всей массы атмосферы и почти весь водяной пар;
- наблюдается понижение температуры с высотой;
- имеют место вертикальные движения воздуха;
- преобладают западные ветры;
- происходит образование облаков и осадков.

Нижний или пограничный слой атмосферы в ее тропосферной части (слой трения) простирается от поверхности земли до высоты в 1000-1500 м. В этом слое в наибольшей степени сказывается тепловое и механическое влияние земной поверхности и наблюдается суточный ход метеоэлементов. Наиболее резкие изменения таких метеоэлементов, как температура, влажность воздуха и ветер, наблюдаются в нижней части пограничного слоя толщиной до 600 метров, которая имеет название приземного слоя атмосферы. Именно в приземном слое атмосферы погодные условия в существенной степени определяются характером подстилающей земной поверхности.

Для полноты проводимого анализа отметим, что средний слой тропосферы располагается от верхней границы пограничного слоя до высоты в 6 км. В нем погодные условия определяются в основном атмосферными фронтами и вертикальными конвективными потоками воздуха и практически не зависят от земной поверхности. Что касается верхнего слоя тропосферы, то он простирается от верхней границы среднего слоя вплоть до нижней границы тропопаузы. Отметим, что в зоне тропопаузы или под ее нижней границей, скорость ветра, как правило, достигает максимальных значений, что, несомненно, необходимо учитывать при прокладке трасс полета воздушных судов [21].

Различают сглаженную скорость ветра за некоторый небольшой промежуток времени и мгновенную скорость ветра в данный момент времени. Наибольшая средняя годовая скорость ветра в 22 м/сек наблюдалась на побережье Антарктиды. Средняя суточная скорость ветра в этом районе иногда доходит до 44 м/сек, а в отдельные моменты достигает величины 90 м/сек [25]. Скорость ветра имеет суточный ход. Он близок к суточному ходу температуры. Максимальная скорость в приземном слое атмосферы (100 м/с – летом, 50 м/с – зимой) наблюдается в 13-14 часов, минимальная скорость – в ночные часы. В более высоких слоях атмосферы суточный ход скорости обратный. Это объясняется изменением интенсивности вертикального обмена в атмосфере в течение суток. Днем интенсивный вертикальный обмен затрудняет горизонтальное перемещение воздушных масс. Ночью этого препятствия нет, и воздушные массы перемещаются по направлению барического градиента. Отметим, что под ветром, как правило, рассматривают горизонтальное перемещение воздушных масс. Тем не менее, существуют и вертикальные движения воздуха, которые играют важнейшую роль в таких атмосферных процессах, как перенос тепла и водяного пара по вертикали, образование облаков и осадков, рассеяние облаков, развитие гроз, возникновение турбулентных зон и т.д. В зависимости от причин

возникновения различаются следующие виды вертикальных движений воздуха [21]:

- Термическая конвекция, обусловленная неравномерным нагреванием воздуха от подстилающей поверхности. Скорость восходящих потоков может достигать нескольких метров в секунду, а в отдельных случаях 20-30 м/сек. Нисходящие потоки имеют меньшую скорость (~ 15 м/сек).

- Динамическая конвекция или динамическая турбулентность – неупорядоченные вихревые движения, возникающие при горизонтальном перемещении и трении воздуха о земную поверхность. Вертикальные составляющие таких потоков могут достигать нескольких десятков см/сек, реже нескольких м/сек. Эта конвекция обычно наблюдается в пограничном слое атмосферы до высоты 1-1.5 км. Термическая и динамическая конвекция зачастую присутствуют одновременно, определяя неустойчивое состояние атмосферы.

- Упорядоченные, вынужденные вертикальные движения - это медленное восходящее или нисходящее движение всей воздушной массы. Это может быть вынужденный подъем воздуха в зоне атмосферных фронтов, в горных районах с наветренной стороны или медленное спокойное «оседание» воздушной массы в результате общей циркуляции атмосферы.

- Сходимость воздушных потоков в верхних слоях тропосферы или конвергенция, которая вызывает рост давления у земли и нисходящие движения воздуха по вертикали в этом слое.

- Расходимость воздушных потоков на высотах или дивергенция, наоборот приводит к падению давления у земли и подъему воздуха вверх.

- Волновые движения, которые возникают из-за разности плотности воздуха и скорости его движения на верхней и нижней границе слоев инверсии и изотермии. В гребнях волн образуются восходящие движения, а в долинах - нисходящие. Волновые движения в атмосфере могут наблюдаться в горах на подветренной стороне, где образуются подветренные волны.

При полетах в воздушной массе, где наблюдаются сильно развитые вертикальные потоки, воздушное судно испытывает болтанку и броски, усложняющие пилотирование. Вертикальные потоки воздуха крупного масштаба могут вызвать большие вертикальные перемещения воздушных судов. Это бывает особенно опасным при полетах в горных районах на подветренной стороне хребта, где нисходящий поток может явиться причиной столкновения воздушного судна с землей.

Таким образом, рассмотренные выше различные атмосферные явления, связанные с перемещением и движением воздушных масс в различных направлениях и с разной скоростью, могут существенно осложнить эксплуатацию воздушных судов и более того привести к трагическим последствиям [23]. С точки зрения требований к авиационной безопасности при взлете и посадке воздушных судов в аэропортах одним из важнейших характеристик движения воздушных масс является сдвиг ветра в приземном слое атмосферы. Необходимо отметить, что за последние десятилетия в мировой гражданской авиации произошел ряд авиационных происшествий на взлете и при заходе на посадку в условиях возмущенной внешней среды. При этом среди основных факторов этих происшествий были признаны сдвиги ветра [2, 26].

Сдвиг ветра в приземном слое атмосферы, как метеорологическое явление, известен достаточно давно, а начиная с 60-70-х годов 20 века, его изучению стали уделять все большее внимание. В результате исследования условий образования и количественных характеристик сдвига ветра и его влияния на динамику полета воздушных судов были разработаны мероприятия, целью которых является обеспечение безопасности взлета и посадки в зоне этого атмосферного явления. Кроме того, были разработаны средства и методы обнаружения сдвига ветра, а также рекомендации летному составу. В то же время проблему сдвига ветра нельзя считать окончательно решенной. Рассматриваемое метеоявление требует организации и проведения комплексных исследований по таким направлениям, как определение

нормируемых характеристик сдвига ветра, развитие надежных бортовых и наземных методов обнаружения и измерения сдвига ветра, разработка средств обеспечения безопасности полета в условиях сдвига ветра и рекомендаций летным экипажам [27].

Наиболее опасное влияние сдвига ветра происходит в приземном слое атмосферы толщиной всего в несколько десятков метров. В результате от начала его воздействия до касания воздушным судном земной поверхности при посадке проходит настолько мало времени, что экипажу приходится принимать решения и выполнять необходимые действия в условиях жесточайшего лимита времени. Очевидно, что в такой ситуации как на контрольно-диспетчерский пункт, так и экипажам воздушных судов в оперативном режиме должна поступать достоверная информация о наличии сдвига ветра не только в зоне взлета и посадки, но также и в районе аэродрома.

Сдвиг ветра представляет собой метеорологическое явление, при котором происходит резкое изменение скорости и (или) направления ветра в пределах ограниченного пространства и за короткий промежуток времени. Сдвиг ветра может быть вызван множеством метеорологических явлений таких, как грозы, струйные течения на малых высотах, фронтальные системы, а также горные волны, береговые и морские бризы. В зависимости от ветровых характеристик пространства в атмосфере, в котором определяется сдвиг ветра, различают следующие его разновидности:

1. Вертикальный сдвиг ветра, характеризующийся изменением скорости ветра по вертикали и количественно определяемый как отношение разности скоростей ветра в двух точках по вертикали к земной поверхности к расстоянию между ними.

2. Горизонтальный сдвиг ветра, определяемый отношением разности скоростей ветра в двух точках по горизонтали к расстоянию между ними. Мерной базой для горизонтального сдвига принято считать 600 м (размерность горизонтального сдвига м/с на 600 м).

3. Вертикальные нисходящие или восходящие потоки, также включаемые в общее понятие сдвига ветра.

Классификация различных видов сдвига ветра по критерию интенсивности в соответствии с рекомендациями ИКАО дана в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Классификация сдвига ветра

Вид сдвига ветра по интенсивности	Вертикальный сдвиг ветра, м/с на	Горизонтальный сдвиг ветра, м/с на	Скорость восходящего или
Слабый	0—2	0—2	0—2
Умеренный	2—4	2—4	2—4
Сильный	4—6	4—6	4—6
Очень	Более 6	Более 6	Более 6

Отметим, что самыми опасными видами сдвига ветра являются микропорывы, которые представляют собой сильные нисходящие потоки воздуха. Обычно микропорыв распространяется до высоты несколько сотен метров и имеет диаметр от 1 до 5, а иногда и до 8 км. При этом скорость приближения микропорыва к земле может превышать 120 км/ч. Эти нисходящие потоки расходятся по мере приближения к поверхности земли, создавая сильные горизонтальные (радиальные) потоки, скорость которых достигает 160 км/ч. Попадая в зону действия микропорыва, экипаж воздушного судна с большим трудом обеспечивает пилотирование, а неожиданно возникающие возмущения состояния атмосферы чрезвычайно опасны при посадке.

Микропорыв образуется вследствие сильного нисходящего потока воздуха, который ударяется о поверхность земли и растекается затем с образованием вихря. При достижении поверхности, микропорыв распространяется в направлении от центра нисходящего потока. Это вызывает присутствие и вертикального, и горизонтального сдвига ветра. В случае попадания любым воздушным судном на взлете или при посадке в зону микропорыва происходит резкое изменение попутной и встречной

скорости ветра, что может быть чрезвычайно опасным для всех типов летательных аппаратов. Схема образования сдвига ветра при наличии микропорыва показана на рисунке 1.1.

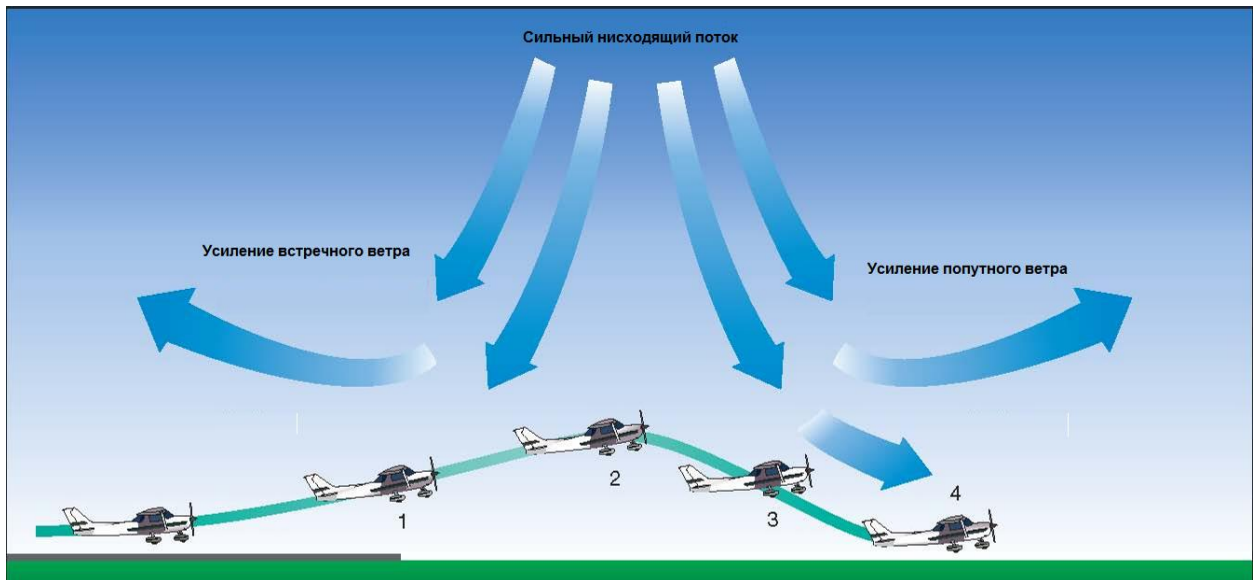


Рисунок 1.1 - Схема образования сдвига ветра при наличии микропорыва

Сдвиг ветра может создать серьезную опасность для воздушных судов в пределах 300 м над уровнем земли, особенно во время посадки и в фазе взлета. В частности самолет, может столкнуться с нисходящим потоком встречного ветра, который создаст дополнительную подъемную силу или приведет к ее снижению.

Особенности микропорывов можно описать следующими параметрами:

1. *Размер* – приблизительно 2 км в диаметре на высоте 600м от поверхности земли и увеличением горизонтальных размеров на поверхности земли до 4-5 км.

2. *Интенсивность* - Вертикальные ветры: скорость порядка 30 м/с. Горизонтальные ветры, скорость порядка 20 м/с у поверхности Земли, а сдвиг ветра до 40 м/с.

3. *Тип* - микропорыв обычно сопровождается проливным дождем в областях, где большая влажность. Однако, в более сухих областях, у

падающих капель дождя может быть достаточное количество времени и расстояния, чтобы испариться прежде, чем достигнуть поверхности. Это известно как VIRGA.

4. *Продолжительность* - жизненный цикл микропорыва от начальной стадии к распаду редко бывает более чем 15 минут с максимальными интенсивностями ветров, длящимися приблизительно 2 - 4 минуты. Иногда микропорывы формируют линейную структуру, тогда, длительность может продолжаться порядка одного часа. При возникновении хотя бы одного микропорыва, существует высокая вероятность образования нескольких микропорывов, и это следует учитывать при прогнозировании.

Вертикальный сдвиг ветра может быть как положительным, так и отрицательным. При положительном сдвиге скорость ветра при удалении от земли возрастает, а при отрицательном - убывает. Установлено, что наиболее опасной зоной влияния вертикального сдвига на воздушное судно при заходе на посадку является высота до 30 м от поверхности ВПП. В связи с этим базовым расстоянием, на котором измеряется вертикальный сдвиг ветра, в руководящих документах по авиационной безопасности [2] принимается, как правило, 30 м. В метеорологии в качестве базовой величины используется приземный слой атмосферы толщиной 100 м. В соответствии с определением вертикального сдвига ветра его размерность есть м/с на 30 м или м/с на 100 м, хотя формально размерность сдвига есть с^{-1} .

Изменения направления и (или) скорости ветра в определенном слое атмосферы могут сочетаться с турбулентностью и (или) сильными вертикальными потоками воздуха, поэтому значительные сдвиги ветра относятся к категории опасных внешних воздействий среды (ОВВС). В отличие от обледенения и грозы, которые могут быть обнаружены визуально или с бортовых технических средств, сдвиг ветра – явление невидимое для традиционных средств диагностики метеорологической обстановки часто и внезапное.

Метеорологические обсерватории и станции в течение ряда лет проводят измерения величин сдвига ветра в целях определения максимальных и наиболее вероятных значений сдвига. На практике эта информация необходима для проектирования и создания средств обнаружения и измерения сдвигов ветра, для обучения экипажей, для сертификации систем автоматической посадки и т.д.

В результате проведенного анализа следует отметить, что в соответствии с требованиями руководящих документов для надежного детектирования сдвига ветра, необходимо иметь информацию о скорости и направлении ветра с пространственным разрешением как минимум 30 метров. Возможно изменение этих параметров, так как, например, в Гонконгской Метеорологической обсерватории при детектировании сдвига ветра с помощью лидара, и в случае возникновения опасности, изменение скорости ветра по глиссаде фиксируется при более жестких требованиях, например к пространственному разрешению.

1.2 Физические основы измерения ветровых характеристик атмосферы лидарными профилометрами

С физической точки зрения в основе функционирования лидарного профилометра лежат свойство когерентности электромагнитных волн и эффект Доплера [28] при отражении лазерного сигнала от атмосферных аэрозолей. При распространении в атмосфере лазерного луча происходит рассеяние электромагнитной волны на частицах аэрозоля, увлекаемых ветровым потоком. По доплеровскому сдвигу частоты регистрируемого сигнала обратного рассеяния определяется составляющая скорости ветра. При этом важнейшим фактором при решении задачи оценки радиальной составляющей скорости ветра является степень когерентности используемого лазерного излучения.

Когерентность может быть временной и пространственной. Временная когерентность связана со степенью монохроматичности электромагнитных колебаний, а степенью пространственной когерентности характеризуют геометрию проводимых экспериментов [28]. В общем случае комплексная степень когерентности $\gamma_{12}(\Delta t)$ электромагнитных волн с частотой ω , излучаемых в двух точках пространства O_1 и O_2 , определяется в произвольной точке P как:

$$\gamma_{12}(\Delta t) = \frac{\langle E_{10}(t + \Delta t)E_{20}^*(t) \rangle}{\sqrt{\langle E_{10}^2 \rangle \langle E_{20}^2 \rangle}}, \quad (1.1)$$

где $E_1 = E_{10}(t)e^{i\omega t}$ и $E_2 = E_{20}(t)e^{i\omega t}$ - электромагнитные волны в точках O_1 и O_2 , амплитуды которых являются комплексными числами. Обе волны распространяются в одной среде с показателем преломления n и при отсутствии дисперсии. Кроме того, предполагается, что изменением амплитуд вследствие разницы расстояний от точки P до точек O_1 и O_2 можно пренебречь. Очевидно, что в случае интерференции двух монохроматических волн степень когерентности равна единице. В то же время при интерференции электромагнитных волн, создаваемых абсолютно независимыми источниками, степень когерентности будет равна нулю, а интенсивность в наблюдаемой точке P определяется суммой интенсивностей. Отметим, что оценка скорости ветра при использовании доплеровского сдвига частоты лазерного сигнала не будет зависеть от когерентных свойств электромагнитной волны, если ее степень когерентности будет равна единице.

В ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометрах свойство когерентности позволяет осуществлять гетеродинный прием лазерного сигнала. В основе гетеродинного приема лежит явление

интерференции на приемной площадке фотодетектора двух волн: сигнальной и опорной. Взаимодействие суммарного оптического поля

$$E(r,t) = E_c(r,t) + E_o(r,t)$$

с материалом чувствительной площадки фотодетектора приводит к появлению в выходном токе фотодетектора, помимо других компонент, составляющей на разностной частоте. Эта составляющая определяется интенсивностями и частотами опорного и сигнального излучения, а также фазовым сдвигом двух полей

$$I(t) = I_o + I_c + 2(I_o I_c)^{1/2} \cos[(\omega_o - \omega_c)t + \phi].$$

Поскольку в основе гетеродинного приема лежит интерференция световых полей, существенное значение имеет не только пространственное расположение полей на площадке фотодетектора, но и степень когерентности сигнального и опорного излучений. Это в совокупности определяет поле зрения и эффективность приема. Принцип гетеродинного приема показан на рисунке 1.2.

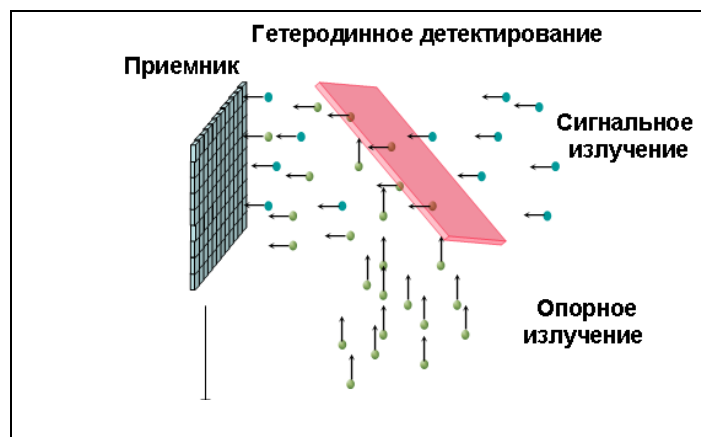


Рисунок 1.2 - Принцип гетеродинного приема

Несмотря на существенное усложнение схемной реализации гетеродинного приема по сравнению с прямым детектированием, данный метод нашел широкое практическое применение благодаря возможности выделения очень слабых оптических составляющих сигнала на фоне собственных тепловых шумов приемника путем повышения интенсивности опорного сигнала. А высокая эффективность лазерного гетеродинирования

обеспечивается изначально высокой степенью когерентности, монохроматичности и направленности источника излучения.

Относительно эффекта Доплера упомянем, что он был сформулирован в 1842 году Христианом Допплером в работе «О цветном свете двойных звезд и некоторых других небесных тел». Эффект Доплера заключается в том, что частота регистрируемого излучения зависит от скорости относительного движения источника и приемника. Этот эффект свойственен любым волновым процессам, включая распространение акустических и электромагнитных волн. В оптическом диапазоне электромагнитных волн эффект Доплера был экспериментально подтвержден в 1868 г. У. Хаггинсом в результате астрономических наблюдений. В России впервые эффект Доплера наблюдал русский астрофизик А.А. Белопольский в 1900 г. в лабораторных условиях при использовании системы вращающихся зеркал.

В соответствии с принципом относительности Эйнштейна уравнения электромагнитной волны по своей форме выглядят одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Используя преобразования Лоренца, можно получить уравнение электромагнитной волны, излучаемой источником, в направлении приемника в другой инерциальной системе отсчета. Следовательно, появляется возможность связать круговые частоты электромагнитных волн, излучаемых источником (ω_0) и воспринимаемых приемником (ω). В результате теория относительности приводит к следующей формуле, описывающей эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме [29]:

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/C^2}}{1 + (V/C) \cos \vartheta} = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - b^2}}{1 + b \cos \vartheta}, \quad (1.2)$$

где V – скорость источника электромагнитного излучения относительно приемника, C – скорость света в вакууме, $b = V/C$, ϑ – угол между вектором

скорости V и направлением наблюдения, измеряемый в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

В случае, если угол $\vartheta = 0$, получим, что

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - V/C}}{\sqrt{1 + V/C}} = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - b}}{\sqrt{1 + b}}. \quad (1.3)$$

Данная формула описывает продольный эффект Доплера, наблюдаемый при движении приемника вдоль линии, соединяющей его с источником электромагнитного излучения. Отметим, что при малых относительных скоростях, когда $V \ll C$, при разложении упомянутой формулы по степеням β и учете членов не выше первой степени получим, что

$$\omega = \omega_0 (1 - V/C) = \omega_0 (1 - b). \quad (1.4)$$

Таким образом, при удалении источника и приемника друг от друга при их положительной относительной скорости наблюдается сдвиг в область более длинных волн ($\lambda > \lambda_0$) и происходит так называемое красное смещение. При сближении же источника и приемника при их отрицательной относительной скорости наблюдается сдвиг в область более коротких волн ($\lambda < \lambda_0$) и происходит так называемое фиолетовое смещение.

Если $\vartheta = \pi/2$, то рассматриваемое выражение примет следующий вид

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - V^2/C^2} = \omega_0 \sqrt{1 - b^2}. \quad (1.5)$$

Данным выражением определяется поперечный эффект Доплера, наблюдаемый при движении приемника перпендикулярно линии, соединяющей его с источником электромагнитного излучения. Из последнего выражения следует, что поперечный эффект Доплера зависит от b^2 и при

малых b является эффектом второго порядка малости по сравнению с продольным эффектом, зависящим от b . В связи с этим обнаружение поперечного эффекта Доплера, который является чисто релятивистским, является чрезвычайно трудным делом, так как связано с замедлением течения времени движущегося наблюдателя. Поперечный эффект Доплера экспериментально был обнаружен в 1938 году в опытах американского физика Г. Айвса, что явилось еще одним подтверждением справедливости теории относительности.

Очевидно, что в связи с тем, что продольный эффект Доплера характеризуется первым порядком малости по отношению к параметру b , он и получил наиболее широкое распространение в самых различных областях науки и техники. В частности, именно продольный эффект Доплера используется при исследовании атомов, молекул, а также космических тел, так как по смещению частоты световых колебаний, которое проявляется в виде смещения или уширения спектральных линий, определяется характер движения излучающих частиц или излучающих тел. Эффект Доплера также получил широкое распространение в радиотехнике и радиолокации, акустической и оптической локации движущихся объектов.

Рассмотрим доплеровский сдвиг частоты $\omega_d = \omega - \omega_0$ в оптическом диапазоне электромагнитных волн при отражении лазерного излучения от движущейся частицы. В линейном приближении продольный эффект Доплера для оптической схемы, показанной на рис. 1.3, можно записать в простом скалярном варианте следующим образом [6].

$$\omega_d = 2 \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) V \cos \beta. \quad (1.6)$$

или

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) V \cos \beta. \quad (1.7)$$

Коэффициент 2 в выражениях (1.6) и (1.7) обусловлен переотражением от движущейся частицы.

Из (1.7) легко выразить скорость рассеивающей частицы через доплеровскую частоту

$$V \cos \beta = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} f_d. \quad (1.8)$$

В случае, если $\beta = \pi/2$, получим, что $f_d = 0$. Когда угол $\beta = 0, \pi$ имеем максимально возможное значение для доплеровского сдвига частоты.

Из (1.9) следует, что рассеивающая частица взаимодействует как с приходящим к ней (от излучателя), так и с уходящим от неё (к приемнику) лазерным сигналом. Эффект максимально проявится, если доплеровский сдвиг частоты в обоих случаях имеет одинаковые знаки. Если же эти знаки разные, то они будут компенсировать друг друга.

При $\beta=\pi/2$ рассеивающая частица «бежит навстречу» к источнику лазерного сигнала, но одновременно с такой же скоростью «убегает» от приемника, и в результате этого два эффекта компенсируются, а суммарный доплеровский сдвиг частоты оказывается равным нулю. При $\beta=3\pi/2$ эффекты также взаимно компенсируются. При $\beta=0$ рассеивающая частица с одинаковой скоростью «бежит навстречу» к приемнику и излучателю, поэтому доплеровский эффект максимален. При $\beta=\pi$ рассеивающая частица с одинаковой скоростью «убегает» и от излучателя и от приемника, поэтому эффект также максимален.

Составляющая вектора $|\vec{V}|\sin\beta$, направленная по биссектрисе угла α , не дает вклада в доплеровское смещение частоты лазерного сигнала, поступающего в приемник, так как с одинаковой скоростью рассеивающая частица в этом направлении «убегает» от приемника и «набегает» на излучатель. Составляющая же вектора скорости потока $|\vec{V}|\cos\beta$, направленная теперь по биссектрисе угла α , дает двойной вклад в смещение частоты, который имеет одинаковые значения и знаки как по направлению к источнику, так и по направлению к приемнику.

1.3 Сравнительный анализ лидарных профилометров с другими датчиками скорости ветра

В настоящее время для измерения характеристик ветра в атмосфере используют как контактные, локальные или точечные, так и дистанционные методы.

Контактные датчики. К приборам, основанным на контактных методах, относятся так называемые анемометры, устанавливаемые, как правило, на специальных метеорологических вышках или высотных строениях. Среди локальных датчиков следует упомянуть, в первую очередь, наиболее распространенные чашечные, винтовые, крыльчатые, звуковые и другие анемометры, трубки пито и приборы, основанные на трассировке частиц и других методах [6, 30]. Доминирующими локальными датчиками, позволяющими измерять скорость ветра в точке установки, являются чашечные и ультразвуковые анемометры. Внешний вид этих датчиков представлен на рисунке 1.4.

Использование чашечных анемометров является оптимальным выбором с точки зрения соотношения цены-качества. Измерения с помощью чашечных анемометров производят с усреднением по времени в течение порядка 10 минут, что вызвано наличием инерционных моментов. Особенно часто чашечные анемометры используются при необходимости измерять с высокой точностью скорость ветра в диапазоне 4 - 16 м/с, поскольку вне этих пределов погрешность анемометра существенно увеличивается. Точно калиброванные датчики способны измерять скорость ветра за период 10 минут с точностью менее 1 %.



Чашечный анемометр



Ультразвуковой анемометр

Рисунок 1.4 - Чашечный и ультразвуковой анемометры

Ультразвуковые анемометры измеряют время необходимое для прохождения импульса с частотой несущего сигнала порядка 100 kHz от источника к приемнику. Расстояние между ними составляет не более 10 см. Время распространения зависит от скорости ветра на участке распространения и от скорости звука. Для расчета скорости звука ультразвуковые анемометры комплектуются высокоточными датчиками температуры. Поскольку этот тип датчиков не имеет механических подвижных частей, то его надежность выше, чем у чашечных анемометров, однако и цена тоже. Отметим, что 3 – х осевые ультразвуковые датчики способны измерять полный вектор скорости ветра. Так как в датчике этого типа отсутствует проблема инерции, то он пригоден для измерения быстропротекающих процессов, таких как турбулентность и прочие явления и процессы, требующие высокой скорости обновления информации.

Точность измерения скорости ветра для ультразвуковых датчиков обычно составляет порядка 0.5 см/с. Несмотря на определенные особенности работы ультразвуковых датчиков, вызванные, например, геометрией инструмента, которая приводит к значительным погрешностям при

измерении скорости и направления ветра, стандартное отклонение получаемых данных для этого типа датчиков по сравнению с чашечными анемометрами составляет несколько десятков см/с при операции усреднения в течение 10 минут.

Основной недостаток локальных датчиков заключается в невозможности их установки в необходимых точках измерения, например на большой высоте или над ВПП. Отметим, что одним из возможных путей измерения ветровых характеристик атмосферы на больших высотах с помощью локальных датчиков является использование метеозондов. Однако существенный недостаток данного подхода заключается в его низкой оперативности и достаточно высокой стоимости. До высот в сотни метров можно использовать мачты, однако их строительство весьма затруднительно особенно в зоне аэропортов и требует значительных затрат. К тому же архитектура мачты искажает ветровые характеристики атмосферы. Кроме того, применение контактных анемометров серьезно затрудняется при обледенении, сильных ветрах или при штиле, а зона измерений анемометров ограничивается высотой метеовышки либо строения, на которой они установлены.

В результате развития инновационных технологий и удешевления элементной базы с целью преодоления упомянутых выше недостатков использования контактных датчиков для определения параметров структуры поля скоростей ветра в удаленных областях воздушного пространства все большее распространение получают системы дистанционного зондирования. Они характеризуются высокой оперативностью, информативностью и точностью.

Дистанционные датчики. Все дистанционные методы определения параметров скорости ветра можно разделить на четыре класса: акустические [5, 47], радиоакустические [5, 48], радиолокационные [5, 43-45] и лидарные [5, 16, 17, 31]. Каждое из указанных средств имеет свои достоинства и ограничения.

Акустические датчики. В случае акустического зондирования атмосферы предусматривается посылка акустического зондирующего сигнала вверх и прием рассеянного акустического сигнала под некоторым углом к посланному или в обратном направлении. Здесь и само возмущение атмосферы, и измерение доплеровского смещения частоты сигнала выполняется средствами акустики. Возмущающий сигнал может быть как импульсным, так и непрерывным. Среднее смещение частоты рассеянного сигнала служит мерой средней скорости воздушного потока, а ширина частотного спектра смещения отражает степень турбулентности воздушного потока. Отметим также, что для определения скорости ветра из полученного сигнала нужно учесть дополнительно такие параметры, как температура воздуха и влажность. Также из-за искажений, вносимых в сигнал при его распространении до метеоцели и обратно, усложнена методика измерений.

Из-за большой длительности цикла измерения, вследствие относительно малой скорости звука, время восстановления профиля ветра по высоте становится значительным, и исследование быстроменяющихся ветровых полей, в частности, сдвига ветра и турбулентности атмосферы, не представляется возможным. Кроме того, применение акустических средств ветрового зондирования атмосферы обычно ограничено высотами до 700 ÷ 900 м и затруднено при наличии осадков и при высоком уровне естественных шумов. Все это сужает перспективы использования акустических методов зондирования ветровых процессов в атмосфере.

Радиоакустические датчики. Радиоакустическое зондирование атмосферы основано на дифракционном взаимодействии акустического сигнала, который создает в атмосфере периодическую диэлектрическую неоднородность электромагнитного сигнала. Иными словами, имеет место дифракция электромагнитных (радио или оптических) волн на акустических волнах. Рассеянная часть электромагнитного сигнала несет в себе информацию об атмосфере в области метеоцели, в которой встретились электромагнитный и акустический сигналы. По мере продвижения метеоцели

вверх поступает информация о вертикальном профиле физических свойств атмосферы. В результате акустический сигнал является источником, возмущающим атмосферу, а электромагнитный сигнал является информационным. В свою очередь атмосфера на пути следования информационного электромагнитного сигнала искажает его в гораздо меньшей степени, нежели искажался бы акустический сигнал в качестве информационного при чисто акустическом зондировании.

Когерентная составляющая электромагнитного сигнала, рассеянного на созданных акустической волной правильно чередующихся неоднородностях диэлектрической проницаемости воздуха, детектируется радиолокатором (или лидаром) и несет в себе информацию о доплеровском смещении частоты, пропорциональном скорости ветра. Отметим, что предельная дальность радиоакустического зондирования атмосферы существенно зависит от ветровых характеристик: в штилевых условиях достигается высота зондирования 1,5-2 км, а при ветре 10-15 м/с — не более 200-300 м.

Как и при акустическом, методы радиоакустического зондирования чувствительны к изменению скорости акустической волны в атмосфере, которая зависит не только от скорости ветра, но и от влажности и температуры. В радиоакустическом, как и в акустическом зондировании, предполагается, что изменчивость скорости ветра по высоте играет большую роль по сравнению с изменением влажности и температуры.

Радиолокационные датчики. Среди методов радиолокационного зондирования скорости ветра в атмосфере наибольшее распространение получило направление, связанное с проведением измерений в условиях облачности или осадков. В этом случае полезный сигнал формируется при рассеянии радиоизлучения на каплях дождя или поверхностях облаков [42-46]. Скорость ветра вычисляется посредством определения доплеровского сдвига принятого излучения. Недостатком метода является практически невозможность проведения измерений в ясную погоду. При ясной погоде уровень излучения, рассеянного в измерительном объеме, оказывается много

ниже уровня рассеянного излучения, приходящего от "ближней зоны". Кроме этого недостатком радиолокационного метода является крайне низкая эффективность обратного рассеяния излучения радиодиапазона на молекулах воздуха и естественном аэрозоле. Отметим также, что нижняя граница измерений радиолокаторов, работающих в дециметровом и метровом диапазоне длин волн, начинается от $500 \div 900$ м [32] при необходимости определения сдвига ветра в зоне ВПП в диапазоне от единиц метров до сотен метров. Преимуществом является возможность производить зондирование на значительные расстояния (до 100 км).

Лидарные датчики. Для определения параметров ветра в приземном слое атмосферы широко применяются лидарные методы. Отличительной особенностью лидаров является использование лазеров в качестве источников зондирующего излучения, длина волны которого находится в микронном диапазоне, в то время как в радиолокаторах используются длины волн миллиметрового и сантиметрового диапазона. Это дает лидарам преимущество в задачах измерения скорости ветра в атмосфере, где естественный аэрозоль, распределенный в воздушных массах, имеет размер порядка длины волны излучения. Данное обстоятельство облегчает процедуру измерения скорости ветра в условиях высоких значений метеорологической дальности видимости [33]. Развитие в последние годы элементной базы полупроводниковых лазеров и оптоволоконной техники привело к снижению стоимости лазерных компонентов и повышению их надежности. Вследствие этого, появилась возможность использовать оптоволоконные технологии в задачах лазерного мониторинга атмосферы.

По принципу действия лидарные системы могут быть корреляционными [10] и доплеровскими [13, 16, 34, 35]. Корреляционный метод основан на анализе пространственно-временной структуры поля флуктуаций регистрируемого лазерного сигнала, вызванных естественной неоднородностью оптических параметров пространственно-разнесенных рассеивающих объёмов. В доплеровском методе измерения скорости ветра

используется явление доплеровского сдвига частоты зондирующего лазерного излучения при его отражении от атмосферного аэрозоля, увлекаемого ветровым потоком. По доплеровскому сдвигу частоты регистрируемого сигнала обратного рассеяния определяется радиальная составляющая вектора скорости ветра. В доплеровском методе по сравнению с корреляционным требуется более сложная аппаратная реализация, но при этом достигается существенно большая точность.

Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования по разработке и созданию когерентных доплеровских лидаров и возможностей измерения ветра такими лидарами были проведены и ведутся учеными различных стран, начиная с 70-х годов прошлого столетия. Существенный вклад в этом направлении внесли американские ученые Р.М. Хаффакер, Р.М. Хардести, С.М. Хэннон и Р.Г. Фрелих. Среди европейских ученых следует отметить Дж. М. Вогана из Великобритании, П. Х. Фламо из Франции, Х. Вернера, Ф. Коппа и Ш. Рама из Германского аэрокосмического центра (DLR), а также таких российских ученых, как А.С. Борейшо, Г.Г. Матвиенко, В.М. Гордиенко, В.Л. Банах, И.Н. Смалихо и другие. Обширная библиография по данному вопросу представлена в работе [16], в которой, в частности упоминаются такие источники, как [62-82].

В связи с необходимостью определения ветровых характеристик в приземном слое атмосферы на высотах в диапазоне от 10 до 500-600 метров в зоне таких наиболее критических объектов, как аэропорты, атомные и ветровые электростанции, гидротехнические сооружения, химические предприятия и так далее, одним из перспективных рассматривается когерентный доплеровский лидарный метод [16]. Отметим, что именно в этом слое наблюдаются наиболее резкие изменения таких метеоэлементов, как температура, влажность воздуха, а также рассматриваемые нами ветровые характеристики атмосферы, включая сдвиг ветра [26, 36]. В этом случае лидарные профилометры, как с импульсным, так и непрерывным когерентным излучением, представляются одними из дистанционных

датчиков, в наибольшей степени соответствующими задаче оперативного мониторинга ветровых характеристик в зоне ответственности перечисленных выше критических объектов. Очевидно, данное утверждение в полной мере относится и для случая оперативного мониторинга сдвига ветра в зоне ВПП, в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

При этом использование волн оптического диапазона позволяет сделать приёмно-передающую аппаратуру лидара малогабаритной по сравнению с аналогичными радиотехническими и акустическими средствами.

Традиционные методы дистанционного получения профиля ветра в атмосфере с помощью доплеровских лидаров основаны на использовании когерентного импульсного или непрерывного излучения [16]. Несмотря на то, что дальность измерений импульсных систем достигает 10-20 км, их недостатком является наличие «мертвой зоны», которая нередко составляет сотни метров. В то же время ветровые лидары или лидарные профилометры с непрерывным когерентным излучением имеют диапазон рабочих дальностей от единиц до нескольких сотен метров и характеризуются приемлемыми массо-габаритными характеристиками. Ветровым лидарным профилометрам с непрерывным когерентным излучением посвящены такие работы, как [49-50, 62-63, 70-71].

Опыт западных стран свидетельствует об успешном использовании когерентных лидарных профилометров в задачах метеорологического мониторинга и управления воздушным движением. Установленные в районах аэропортов лидары измеряют ветровые сдвиги на летном поле, завихренность следа самолета и другие атмосферные параметры, знать которые необходимо для обеспечения авиационной безопасности в метеорологическом отношении взлета и посадки ВС. В мировой практике авиаметеорологического обеспечения использование лидарных профилометров в этих целях осуществляется с 90-х годов. В частности когерентные лидарные профилометры с целью оперативного мониторинга

сдвига ветра установлены в ряде крупных аэропортов таких стран, как США, Англия, Германия, Франция и Гонконг. В настоящее время разработано и производится несколько ветровых когерентных доплеровских лидаров с использованием, как импульсного, так и непрерывного когерентного излучения, предназначенных для детектирования и измерения ветровых характеристик атмосферы и, в том числе сдвига ветра, на различных дальностях. Среди известных лидаров можно выделить такие как: Windcube производства Leosphere (Франция) [37], ZephIR производства QinetiQ (Англия) [38], Galion производства SgurrEnergy (Англия) [39] и WindTracer американской компании STI Lockheed Martin [40]. В последнее время появились сообщения о разработке Windicator фирмы Optical Air Data Systems, LLC (OADS).

В России разрабатывались опытные образцы лидаров на основе CO₂ лазеров [13, 34], а также на основе полупроводниковых лазеров и волоконных усилителей [35]. Кроме того, рядом российских организаций проведены работы по внедрению интегрированной системы вихревой безопасности полетов в оперативную практику наблюдений за ветровыми характеристиками атмосферы. Эта система включает в себя «Подсистему метеорологического обеспечения», состоящую из наземного модуля, основой которого является лидарный профилометр ПЛВ-300, разработанный НПП «Лазерные системы» (Санкт-Петербург) [49, 50].

Внешний вид лидаров ZephIR, Windcube, Windtracer и ПЛВ-300 показан на рисунках 1.5 – 1.8.



Рисунок 1.5 - Внешний вид лидара ZephIR



Рисунок 1.6 - Внешний вид лидара Windcube



Рисунок 1.7 - Внешний вид лидара Windtracer

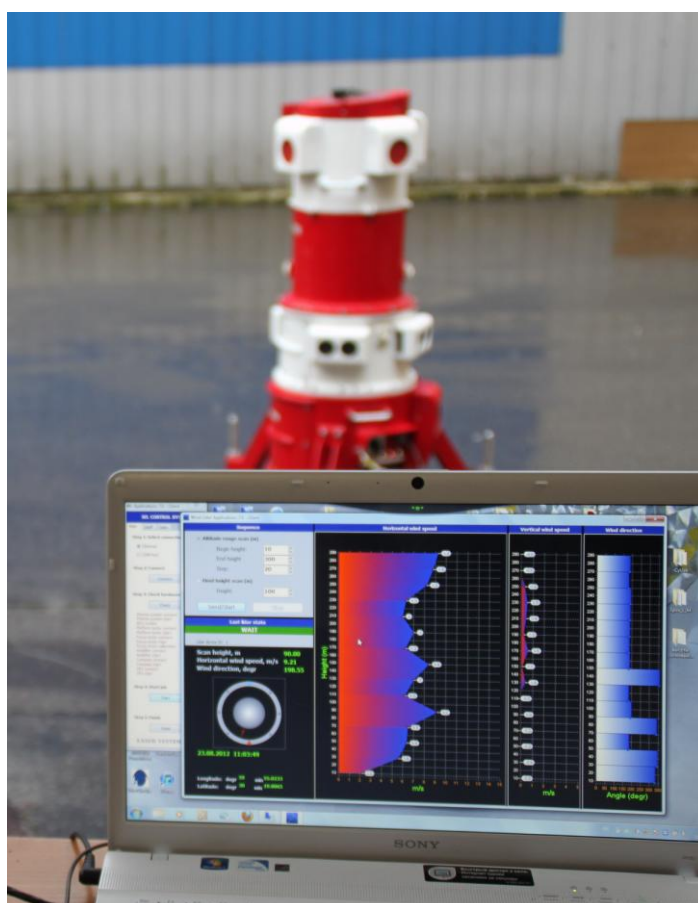


Рисунок 1.8 - Внешний вид лидара ПЛВ-300 с монитором оператора

Каждый из описанных лидаров обладает своими преимуществами и недостатками. При решении задачи измерения ветровых характеристик приземного слоя атмосферы следует принимать во внимание характер и тип местности с расположенными на ней строениями и сооружениями. В частности, при измерении сдвига ветра в зоне ВПП необходимо учитывать индивидуальные особенности аэропорта и близлежащей местности. Основные параметры некоторых из рассматриваемых лидаров сведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Основные параметры рассматриваемых лидаров

Параметр	ZephIR	Windcube	Windtracer	ПЛВ-300
Режим работы	непрерывный	импульсный	импульсный	непрерывный
Длина волны, мкм	1.57	1.54	2.02 (1.6)	1.56
Дальность измерения, м	10 – 150	40 – 200	8000	3 – 300
Угол раствора конуса, °	30	30 (15)	любой	22
Количество высот измерения	5	10	120	Определяется оператором
Пространственное разрешение	1 м. h= 20 м, 25 м. h=110м	26 м	70 м	< ± 10 % Н
Диапазон измеряемых скоростей, м/с	2 – 70	0 – 60	0 – 40	0 – 55
Направление ветра	Нет	да	да	Да
Время измерения полного вектора	3 с. (на одной высоте)	6 с (на всех высотах)	- зависит от типа сканирования	4 с (на одной высоте)

Температурный режим работы, °С	- 25 - +40	- 10 - +40	- 25 - +40	- 40 - +50
Потребляемая мощность	100 W (0°C - 25 °C) 250 W	120 W	3 – 5 KVA	450 W
Габариты, мм	1340 *550 (D) (без метеомачты)	800*550*550	2300 * 2900 * 2400	1500 * 700 (D) мм
Вес, кг	134	45	2730	70 (110)

В 2011 году специалистами Федерального государственного бюджетного учреждения «Главный центр информационных технологий и метеорологического обслуживания авиации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» в рамках «Мероприятий по повышению качества метеорологического обеспечения полетов ВС гражданской авиации и органов ОВД» проведены работы по сертификации профилометра лидарного ветрового с монитором оператора ПЛВ-300.

В результате этого лидарный профилометр ПЛВ-300 с монитором оператора готов к повсеместному внедрению в систему метеорологического обеспечения не только авиационной безопасности аэропортов в России, но и экологической безопасности особо опасных объектов, например таких, как атомные электростанции. В настоящее время проведены все необходимые натурные испытания лидарного профилометра и в том числе в аэропорту Санкт-Петербург (Пулково) с целью выработки рекомендаций по эффективному использованию профилометров лидарных ветровых на аэропортах Российской Федерации. В недалеком будущем предполагается их внедрение и использование в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности аэропортов таких крупных городов, как Владивосток и Сочи.

В заключение отметим, что наряду с отработкой аппаратной части ветровых лидарных профилометров, в настоящее время важнейшую роль играет разработка и совершенствование их информационной системы, составной частью которой является программно-алгоритмическое обеспечение. Отсюда вытекает цель диссертационной работы, которая заключается в разработке математической модели измерительного процесса, методов и алгоритмов обработки лидарного сигнала, состава и структуры программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием в системе метеорологического сопровождения авиационной безопасности, обладающего улучшенными техническими характеристиками, а именно: универсальностью, адаптивностью, оперативностью и возможностью архивирования получаемых данных о ветровой обстановке с последующей статистической обработкой.

Выводы по 1 главе

1. На основании анализа атмосферных явлений выявлено, что ветровые процессы характеризуются высокой динамикой особенно в приземном слое атмосферы до высот в 600 - 1500 метров. С точки зрения авиационной безопасности одним из наиболее опасных метеоявлений при взлете и посадке воздушных судов является сдвиг ветра в первую очередь на высотах в десятки метров. В связи с этим актуальной является задача оперативного мониторинга состояния ветровой обстановки в районе взлетно-посадочной полосы в диапазоне высот от единиц метров до нескольких сот метров.

2. Показано, что использование широко распространенных контактных датчиков или анемометров для определения скорости и направления ветра на траверзе взлетно-посадочной полосы невозможно, и выходом из создавшегося положения является использование дистанционных методов. В соответствии с техническими возможностями, присущими дистанционным

радиолокационным, акустическим и оптическим датчикам, наиболее перспективными являются ветровые когерентные доплеровские лидары с использованием, как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения.

3. Анализ существующих и перспективных ветровых лидаров показал, что при использовании импульсного излучения диапазон дальности измерения начинается от нескольких десятков и даже сотен метров. В то же время для когерентных доплеровских лидаров с непрерывным излучением диапазон дальности измерения начинается от единиц метров, что чрезвычайно важно для мониторинга ветровых характеристик атмосферы в районе ВПП аэропортов на высотах от 3-5 и до 300-500 метров.

4. Несмотря на то, что прогресс в области создания элементной базы, позволил создать на инновационной основе с использованием новейших технологий ветровой лидарный профилометр с непрерывным лазерным излучением, огромные возможности по улучшению его тактико-технических характеристик заключены в направлении, связанном с разработкой и совершенствованием такой составной части его информационного обеспечения, как программно-алгоритмическая часть.

2 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕТРОВОГО ЛИДАРНОГО ПРОФИЛОМЕТРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

2.1 Структура информационного обеспечения ветрового лидарного профилометра

В системе организации воздушного движения важную роль играет метеорологическое обеспечение авиационной безопасности. Решения по управлению процессами взлета-посадки воздушных судов в аэропортах принимаются авиадиспетчерами на контрольно-диспетчерских пунктах (КДП). В настоящее время все большее распространение получают ситуационные центры, целью которых является принятие максимально взвешенных и эффективных решений. Ситуационные центры создаются на принципах ситуационного подхода [51, 52], в основе которого лежит теория ситуационного управления [53, 54]. Составной частью ситуационных центров являются системы поддержки принятия решений (СППР) ответственным лицом. Это лицо называется лицом, принимающим решения (ЛПР). Очевидна соответствующая аналогия. То есть, КДП является, по сути, ситуационным центром, а авиадиспетчер – ЛПР. В то же время система метеорологического обеспечения является частью СППР КДП, на основе анализа информации от которой ЛПР принимает то или иное решение. Таким образом, методология и принципы построения ситуационных центров могут быть использованы при построении информационного обеспечения КДП в аэропортах для повышения эффективности управления воздушным движением. Для повышения эффективности решений, принимаемых ЛПР, необходимо иерархическое построение элементов, входящих в структуру СППР. В нашем случае это касается ПЛВ.

Очевидно, следует исходить из того, что облик ПЛВ должен определяться требованиями, предъявляемыми к нему со стороны СППР КДП.

Благодаря прогрессу в области инфокоммуникационных технологий в соответствии с общим подходом, изложенным в [55], ПЛВ является взаимосвязанной совокупностью средств, включающих аппаратное (hardware), математическое и программно-алгоритмическое (brain-software), а также организационно-методическое (orgware) обеспечение (рисунок 2.1).

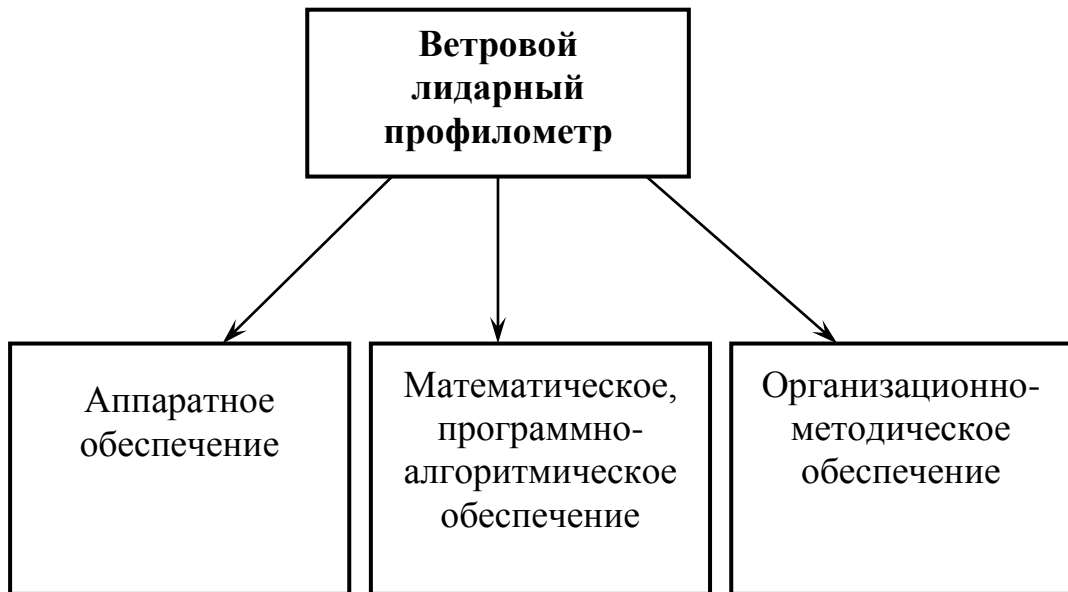


Рис. 2.1 - Ветровой лидарный профилометр, как совокупность средств

Математическое, программно-алгоритмическое и организационно-методическое обеспечения составляют основу информационного обеспечения ПЛВ. Обычно в период эксплуатации ПЛВ вносить изменения в состав и структуру аппаратного обеспечения очень сложно. Поэтому при разработке ПЛВ необходимо стремиться к оптимальному соотношению аппаратного и информационного обеспечения. Требования к этому соотношению определяются задачами, решаемыми СППР КДП.

Математическая и программно-алгоритмическая части информационного обеспечения ПЛВ включают в себя математические модели используемой аппаратуры, объектов наблюдения, трассы распространения сигналов и полей, критерии качества, методы и алгоритмы

обработки данных, базы данных и знаний, системы управления этими базами данных и знаний, а также общее программное обеспечение типа Windows и т.д. [56].

Базы данных (БД) необходимы для накопления и архивирования информации о ветровой обстановке в районе аэропорта, поступающей от ПЛВ. В результате обработки этой информации накапливаются соответствующие знания, для хранения которых должны быть созданы базы знаний (БЗ). Для БД характерны большой объем и относительно небольшая удельная стоимость информации, а для БЗ характерны относительно небольшие объемы, но исключительно дорогие информационные массивы. В настоящее время БД и БЗ являются основой любой интеллектуальной системы [57].

Организационно-методическая часть состоит из технической и эксплуатационной документации, кадрового обеспечения, обучающей системы, управления и сопровождения разработок при широком использовании компьютерных технологий.

Конкретные состав, структура и содержание информационного обеспечения ПЛВ при заданном аппаратном обеспечении, которое, как правило, от образца к образцу постоянно дорабатывается и модернизируется, определяются требованиями, которые исходят от СППР КДП.

В соответствии с положениями, изложенными в работах [20, 58, 59] основной целью СППР КДП является оперативное обеспечение авиадиспетчеров всеми необходимыми видами информации, характеризующей, в частности, состояние авиационной обстановки в районе аэропорта, которое зависит, в том числе, от ветровых характеристик окружающей области земной атмосферы. В результате можно выделить такие основные функциональные возможности СППР КДП, как:

- автоматизированное формирование программы обработки информации по заданной ЛПР цели на конкретном сеансе управления;
- прием информации произвольной природы;

- сохранение принятой и обработанной информации в архивах, реализуемое посредством интерфейсов к имеющимся БД;
- вторичная обработка и интеллектуальный анализ на распределенных вычислительных комплексах;
- графическое представление принятой и обработанной информации в удобном для восприятия виде;
- оповещение (в том числе мультимедийное) о происшедших ситуациях с регистрацией действий ЛПР;
- формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации;
- обмен информацией с автоматизированной системой управления верхнего уровня иерархии;
- формирование и выдача ЛПР управляющих воздействий (команд, временных программ и т.д.) в соответствии с заданным законом управления;
- формализация и формирование информации с целью пополнения БЗ.

Таким образом, целями функционирования СППР КДП являются следующие:

- контроль функционирования системы управления воздушным движением (СУВД);
 - выработка и выдача управляющих воздействий в соответствии с целями функционирования СУВД;
 - контроль работоспособности СУВД;
 - диагностирование неисправностей, возникших в СУВД;
 - прогнозирование поведения СУВД на заданном интервале прогноза;
 - оценка выполнения и качества программы функционирования СУВД
- и др.

Важную роль в информационном обеспечении играет разработка и наполнение БЗ ПЛВ, интегрированной в БЗ СППР КДП. Таким образом, взаимосвязь информационного обеспечения ПЛВ и СППР КДП позволяет повысить эффективность использования данных о ветровой обстановке [21].

Накопление информации о ветровой обстановке в районе аэропорта позволяет провести соответствующий анализ и тем самым осуществлять прогноз о поведении атмосферы в будущем. Выявление сезонных изменений в поведении ветровых атмосферных явлений позволяет в будущем более эффективно планировать процессы, связанные с обслуживанием пассажиропотока в аэропортах с учетом необходимости поддержания высокого уровня авиационной безопасности.

В современных условиях требования к СППР КДП в информационно-аналитической деятельности возрастают по следующим причинам:

- сокращаются сроки представления данных вышестоящему руководству;
- увеличивается количество факторов, которые необходимо учитывать при принятии решений в СУВД;
- предъявляются повышенные требования к оперативности управления изменениями целей, стратегий и формированию управляющих воздействий с целью повышения эффективности СУВД, особенно в условиях повышения интенсивности воздушного движения.

Таким образом, стационарные и мобильные системы дистанционного зондирования атмосферы, отличающиеся разнотипностью и многорежимностью, а также имеющие ограничения по функциональной, технологической, технической, топологической и организационной совместимости, должны быть объединены в единую систему посредством сети информационно-управляющих связей. В связи с этим СППР КДП, основой которой являются системы дистанционного зондирования атмосферы и в том числе ПЛВ, представляет собой сложную организационно-техническую систему. К вопросам анализа, синтеза и управления СППР КДП необходимо подходить с ситуационных позиций, с использованием методологии ситуационного подхода, с применением технологии ситуационного анализа. В то же время необходимо отметить, что в условиях устойчивой и стабильной ситуации, следует использовать самый

широкий арсенал методов и средств системного подхода, который является составной частью ситуационного подхода и вне сомнения зарекомендовал себя чрезвычайно продуктивным и высокоэффективным.

2.2 Математическая модель измерительного процесса ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра

В основе методики и алгоритма обработки сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием непрерывного типа лежит математическая модель измерительного процесса. Работа КДЛ построена на допущении, что лазерное излучение на частоте f по мере распространения в атмосфере рассеивается на аэрозольных частицах, увлекаемых ветром, скоростные характеристики которого за время измерения практически не изменяются. С учетом скорости движения этих частиц частота обратно рассеянной волны, как это было показано в первой главе, изменяется согласно эффекту Доплера.

Если рассмотреть зондирующий луч ω_T , наблюдаемый в системе, связанной с движущимися частицами, а также луч ω_R , рассеянный назад к лидару этими же движущимися частицами, то для круговой частоты этих лучей можно записать следующие соотношения:

$$\omega_T = \omega + \mathbf{V} \cdot \mathbf{k}_1; \quad \omega_R = \omega + \mathbf{V} \cdot \mathbf{k}_2,$$

где, ω - круговая частота используемого для зондирования атмосферы лазерного излучения, а \mathbf{V} обозначает вектор мгновенной скорости ветра,

\mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 – волновые вектора, модули которых или иначе волновые числа равны $k = 2\pi / \lambda$ (λ – длина волны лазерного излучения).

В результате доплеровский сдвиг частоты можно записать следующим образом:

$$\Delta\omega = \omega_R - \omega_T = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1).$$

В рассматриваемом случае приемник рассеянного аэрозольными частицами сигнала расположен в том же месте, где и передатчик. Следовательно, $\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}_1$, и выражение для частотного сдвига может быть записано следующим образом:

$$\Delta\omega = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) = 2\mathbf{V} \cdot \mathbf{k}_2 \approx 2V_r |\mathbf{k}_2| = 2V_r k$$

$$\text{или } \Delta\omega = 2\pi\Delta f = 2\frac{2\pi}{\lambda} V_r,$$

где V_r – радиальная составляющая скорости ветра или иначе проекция мгновенного вектора скорости $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ на направление зондирования. Таким образом

$$V_r = \frac{\Delta f \lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} f_D,$$

где $\Delta f = f_D$ – непосредственно измеряемый доплеровский сдвиг частоты.

Необходимо отметить, что в существующих и разрабатываемых КДЛ может использоваться как импульсное, так и непрерывное лазерное излучение. КДЛ с импульсным излучением, как правило, позволяет проводить зондирование атмосферы на расстоянии от сотни метров до десятков километров. В то же время для обеспечения мер авиационной безопасности в приземном слое атмосферы, особенно в районе взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта при высокой интенсивности полетов воздушных судов необходимо проводить оперативный мониторинг ветровых характеристик атмосферы на расстоянии от единиц метров до нескольких сотен метров. Таким требованиям в настоящее время отвечают среди лидаров, как нам представляется, только КДЛ с непрерывным излучением. Отметим, что с помощью КДЛ с непрерывным излучением при фиксированном положении оси зондирующего пучка можно измерять лишь радиальную составляющую вектора скорости ветра. Для получения полной информации о скорости ветра необходимо проводить измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве. Для этого используются различные методы сканирования

атмосферы, в соответствии с которыми положение рассеивающего объема изменяется в пространстве по выбранному заранее закону путем управления фокусным расстоянием приемо-передающей оптической системы. В соответствии с известными методами КДЛ с непрерывным излучением может работать в таких режимах сканирования, как RHI, PPI, VAD, либо их различная комбинация. Существует также возможность программирования нестандартного закона сканирования.

1. Range Height Indicator (RHI) – режим, при котором азимутальный угол остается постоянным, а угол места изменяется в определенном диапазоне. При сканировании в данном режиме перпендикулярно ВПП существует возможность измерения поперечного ветра, поскольку при таком сканировании строится зависимость радиальной скорости ветра от высоты, и при малых углах места это, по сути, и есть поперечный ветер.
2. Plan Position Indicator (PPI) – режим, при котором угол места остается фиксированным, как правило менее 10° , а азимутальный угол меняется либо во всем возможном диапазоне, либо в выбранном секторе.
3. Velocity Azimuth Display (VAD) – режим, при котором измерения производятся на нескольких азимутальных углах (обычно 8) при фиксированном угле места. В результате полученный профиль вертикальной скорости над лидаром записывается в отдельный файл для последующего анализа.

В данной работе рассматриваются в первую очередь методы и алгоритмы обработки сигнала ветрового КДЛ с непрерывным излучением, в котором применяется коническое сканирование приземного слоя атмосферы.

Принцип конического сканирования приземного слоя атмосферы заключается в следующем. Как было упомянуто выше, для получения полной информации о трех компонентах вектора скорости ветра в декартовой системе координат $\vec{V} = \mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\} = \{u, v, w\}$ с помощью КДЛ

необходимо провести измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве. В соответствии с рисунком 2.2, поясняющим принцип конического сканирования атмосферы, на заданной высоте h , радиальную составляющую скорости ветра можно записать следующим образом:

$$V_r = (u \cos \theta + v \sin \theta) \cos \varphi + w \sin \varphi,$$

где θ - угол азимута лазерного луча, который изменяется в интервале $[0; 2\pi]$, а φ - угол места лазерного луча, изменяющийся в диапазоне $[0; \pi/2]$.

Таким образом, при измерении радиальной скорости ветра в одной точке записывается только одно уравнение при трех неизвестных. При измерении радиальной составляющей скорости ветра в трех независимых точках в пространстве на заданной высоте для трех неизвестных параметров записывается система из трех независимых уравнений. Решение данной системы уравнений позволяет определить полный вектор скорости ветра. При непрерывном вращении лазерного луча по углу азимута путем отбора его дискретных положений получается переопределенная система уравнений, которая решается методом наименьших квадратов.

Отметим, что измерение полного вектора скорости ветра при коническом сканировании воздушного пространства приземного слоя атмосферы когерентным лазерным лучом на различных высотах достигается путем соответствующего изменения фокусного расстояния оптической системы КДЛ. Ключевым моментом принципа конического сканирования является предположение о “замороженности” ветровых характеристик атмосферы за время сканирования на заданной высоте.

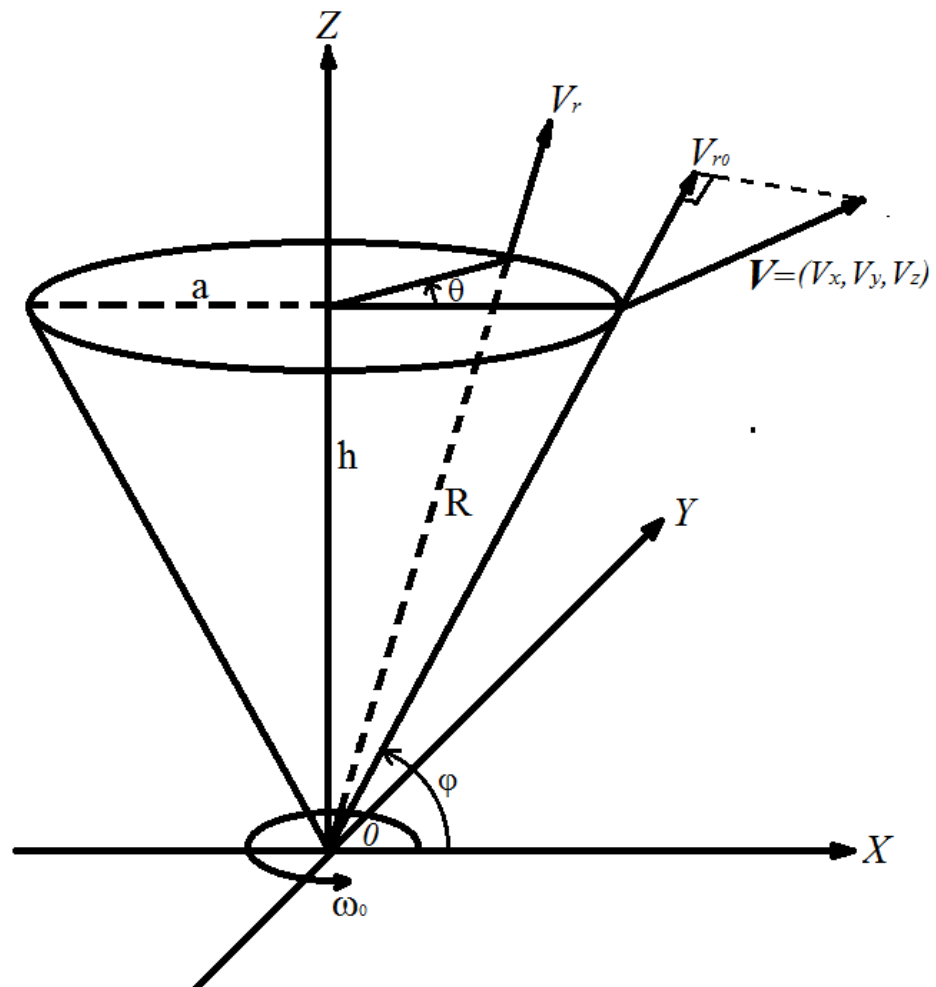


Рисунок 2.2 - Принцип конического сканирования приземного слоя атмосферы лазерным лучом

В случае, когда ветровые характеристики атмосферы за период полного сканирования лазерным лучом по углу азимута на заданной высоте остаются постоянными, радиальная составляющая вектора скорости ветра изменяется по синусоидальному закону, как это показано на рисунке 2.3.

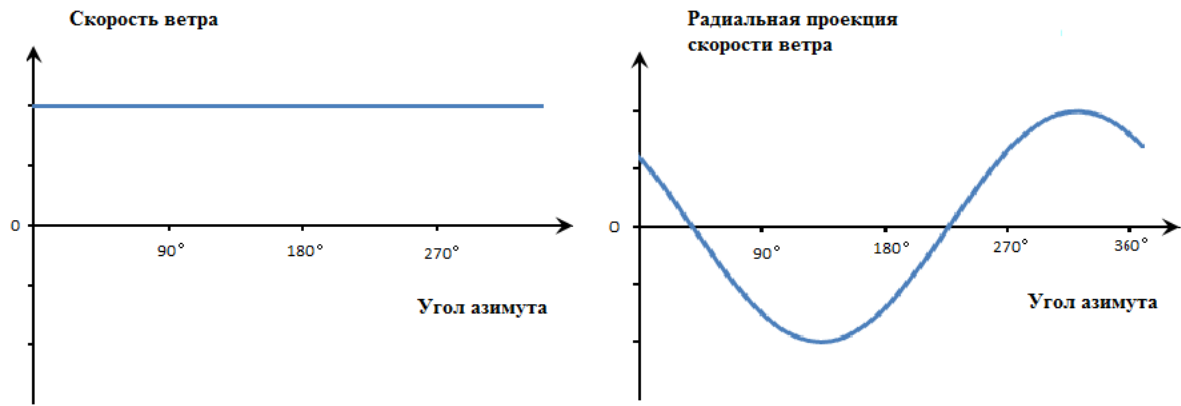


Рисунок 2.3 - Закон изменения радиальной составляющей скорости ветра при постоянстве ветровых характеристик атмосферы при коническом сканировании

Так как практически осуществляется измерение абсолютных значений доплеровского сдвига частоты, то и полученные результаты должны аппроксимироваться следующей функцией:

$$V_r = |a + b \cdot \cos(\theta - \theta_{\max})|,$$

где a , b – аппроксимирующие коэффициенты.

Направление ветра по азимуту определяется как угол θ_{\max} , соответствующий максимальной положительной скорости. Величина горизонтальной составляющей скорости ветра определяется максимумом амплитуды гармонической функции. Очевидно, что смещением полученной синусоидальной кривой по оси ординат определяется величина вертикальной составляющей вектора скорости на высоте измерения. Направление ветра определяется углом θ_{\max} , соответствующим максимальной положительной скорости. Направление ветра можно определить также и аппаратным методом за счет дополнительного сдвига частоты принимаемого сигнала. Один из таких методов описан в патенте РФ №121379 [60] на полезную модель “Устройство для дистанционного измерения скорости ветра”.

Схематически процесс измерения радиальной составляющей скорости ветра при коническом сканировании воздушного пространства лазерным лучом на различных высотах представлен на рисунке 2.4. Необходимые для

проведения сеанса измерений высоты выбираются путем соответствующего изменения фокусного расстояния оптической системы лидара.

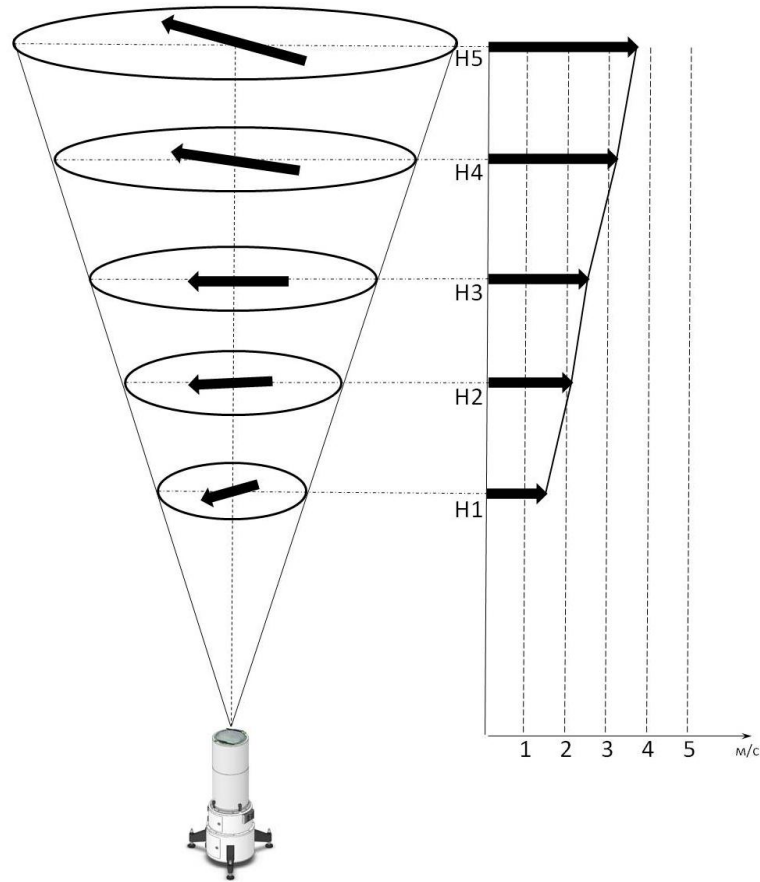


Рисунок 2.4 - Схема измерения скорости ветра на различных высотах

Таким образом, совокупность измерений, полученную в результате конического сканирования воздушного пространства на заданной высоте, можно аппроксимировать синусоидальной функцией с использованием метода наименьших квадратов [16, 85]. Путем измерения вектора скорости на нескольких высотах можно построить вертикальный профиль распределения ветра.

Необходимо отметить, что при обработке данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра следует учитывать особенности измерительного процесса, связанные с изменением размеров измерительного объема атмосферного участка в зоне перетяжки лазерного луча, отражающего в сторону приемного устройства.

Радиус лазерного луча изменяется при удалении от передающей апертуры по закону:

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \left(\frac{z}{b} \right)^2 \right)$$

где $w(z)$ – радиус передающей апертуры; z – расстояние от апертуры до измерительного объема, b – рэлеевская длина (равная половине длины перетяжки); w_0 – радиус перетяжки лазерного луча. Для пояснения формулы ниже приводится рисунок 2.5.

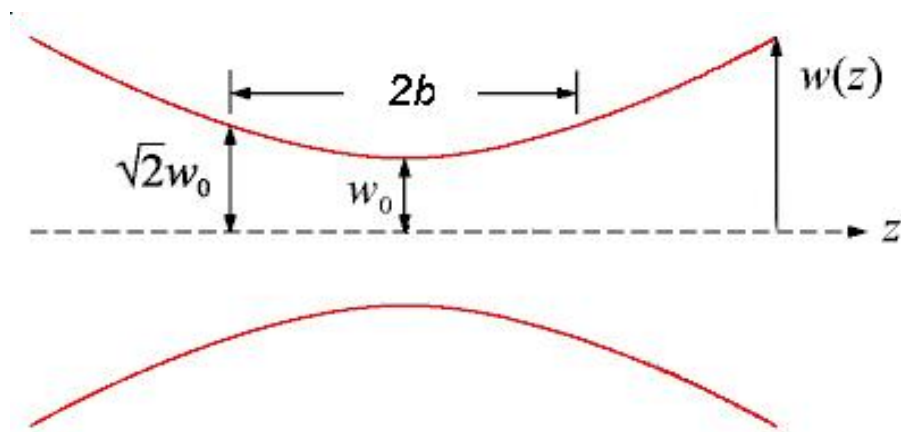


Рисунок 2.5 - Продольный профиль гауссова пучка

Отметим, что радиус лазерного луча в перетяжке в соответствии с гауссовой оптикой определяется соотношением:

$$b = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

Следовательно:

$$w_0 = \sqrt{\frac{b\lambda}{\pi}} .$$

На рисунке 2.6 схематично показаны параметры луча при сканировании воздушного пространства.

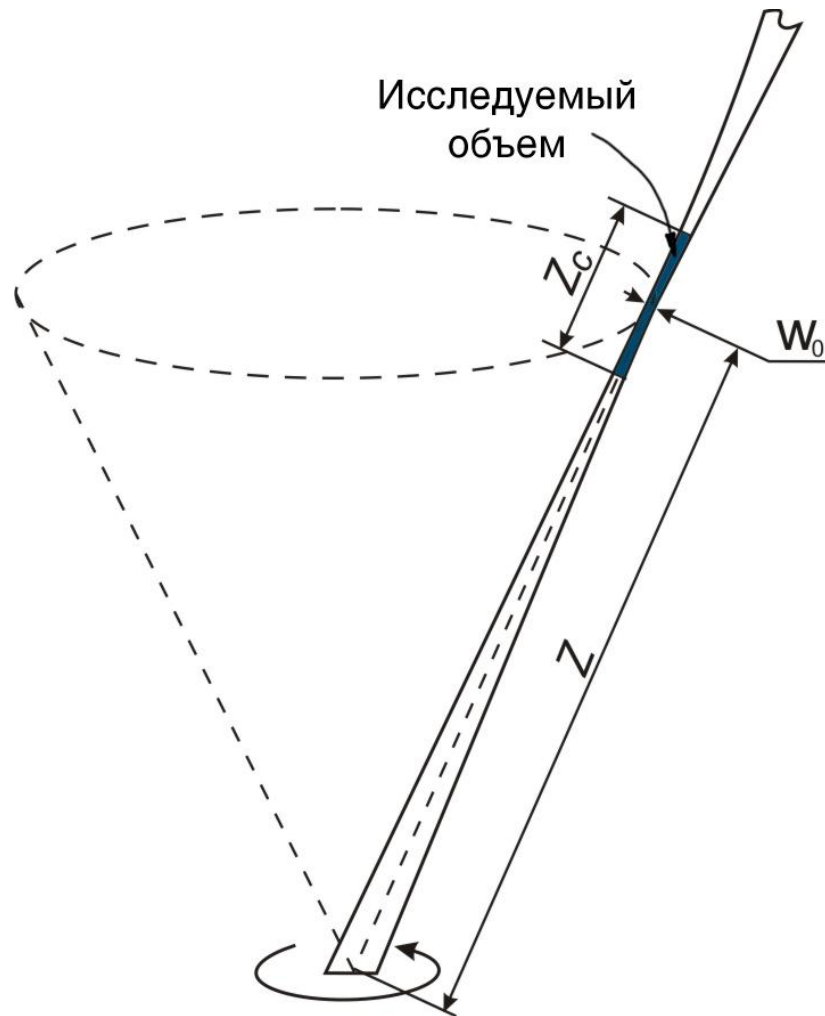


Рисунок 2.6 - Исследуемый объем на траектории движения луча

Отсюда следует, что при заданном диаметре апертуры передающей оптики измерительный объем увеличивается по квадратичной зависимости от высоты фокусировки и достигает максимума на максимальной заданной высоте. Необходимо отметить, что в [16] в соответствии со ссылкой на работы [83, 84], основанные на результатах натуральных экспериментов, и собственными теоретическими исследованиями с использованием, в том числе, методов компьютерного моделирования, указывается на отклонение одномерной плотности вероятности эхосигнала ветрового КДЛ с непрерывным излучением от гауссова распределения при формировании лидаром зондируемого измерительного объема малых размеров, когда начинает проявлять себя микроструктура аэрозольных частиц. По всей

вероятности подобная ситуация наблюдается при определенных соотношениях зондируемого измерительного объема, величины плотности увлекаемого ветром аэрозоля или других рассеивающих лазерное излучение частиц, а также ветровых характеристик самой атмосферы. Очевидно, что наряду с отклонением статистического описания принимаемого сигнала от гауссовского возможно также отклонение доплеровского спектра от колоколообразного вида. Тем не менее, в данной работе без ухудшения тактико-технических требований к измерению ветровых характеристик приземного слоя атмосферы в заданном диапазоне высот принимается гауссовская модель статистического описания сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа и колоколообразный вид его доплеровского спектра.

Таким образом, методика расчета сдвига ветра с помощью ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием непрерывного типа заключается в следующем:

1. Осуществляется сканирование атмосферы по определенному конусу, выбор не менее трех независимых положений области перетяжки лазерного луча на заданной высоте и запись гетеродинного сигнала.
2. Производится обработка принятого гетеродинного сигнала ПЛВ методами, позволяющими оценить параметры доплеровского сдвига частоты в выбранных положениях перетяжек лазерного луча на окружности сканирования и вычислить значения радиальных скоростей ветра.
3. Производится решение переопределенной системы уравнения, содержащих значения полученных за полный оборот сканирования радиальных скоростей ветра, методом наименьших квадратов с целью определения абсолютного значения скорости ветра.
4. Проводится повторение пунктов 1-3 обычно еще два раза.

5. Осуществляется изменение частотных параметров лидарного профилометра и повторение пунктов 1-3 с целью определения наряду с абсолютным значением скорости ветра также и направления ее вектора.

Графическая интерпретация общего алгоритма обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием показана на рисунке 2.7.

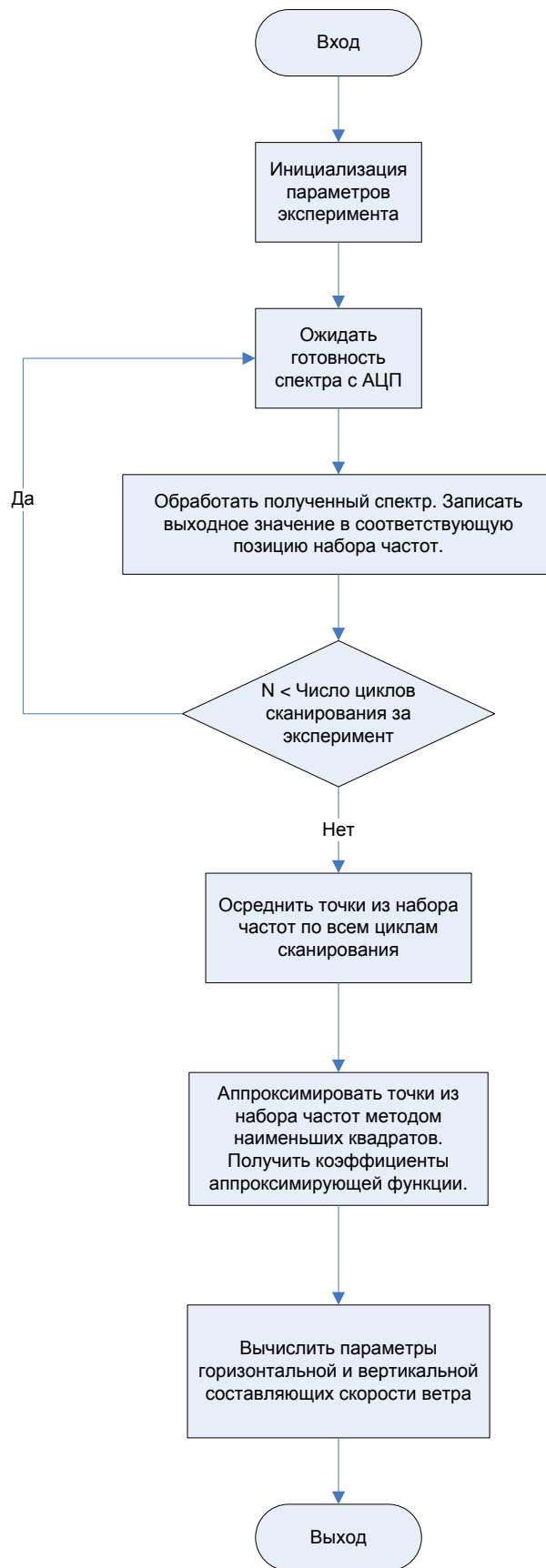


Рисунок 2.7 - Общий алгоритм обработки данных ПЛВ

В соответствии с общим алгоритмом обработки данных ПЛВ наиболее важными и ответственными являются этапы определения центральной частоты в доплеровском спектре полезного сигнала и решение системы уравнений для получения значений составляющих полный вектор скорости ветра. Целью алгоритма обработки спектров служит подавление шумов в исходных спектрах и выделение доплеровского спектра полезного сигнала, имеющего, как правило, импульсный или колоколообразный вид, как это показано на рисунке 2.8.

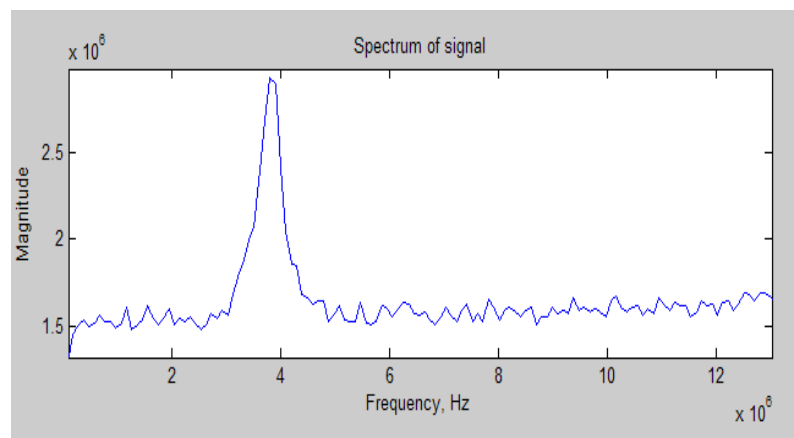


Рисунок 2.8 - Вид доплеровского спектра полезного сигнала

В идеальном случае, когда отношение сигнал-шум велико, специальной обработки не требуется, но в реальных условиях доплеровский спектр полезного сигнала может быть слабым или сильно зашумлён, как это показано на рисунке 2.9.

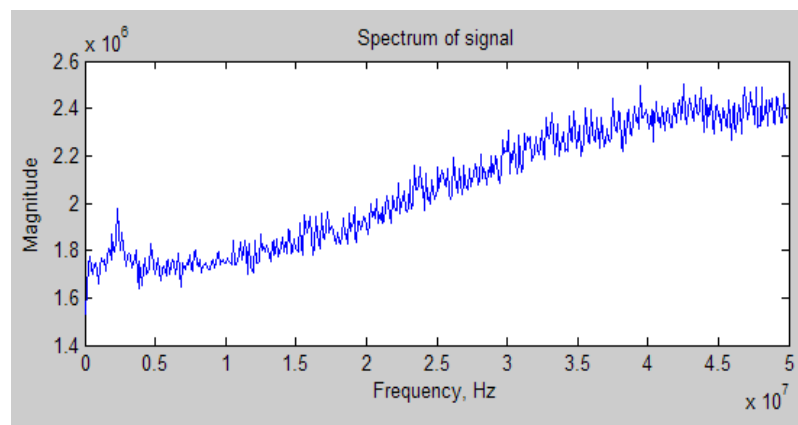
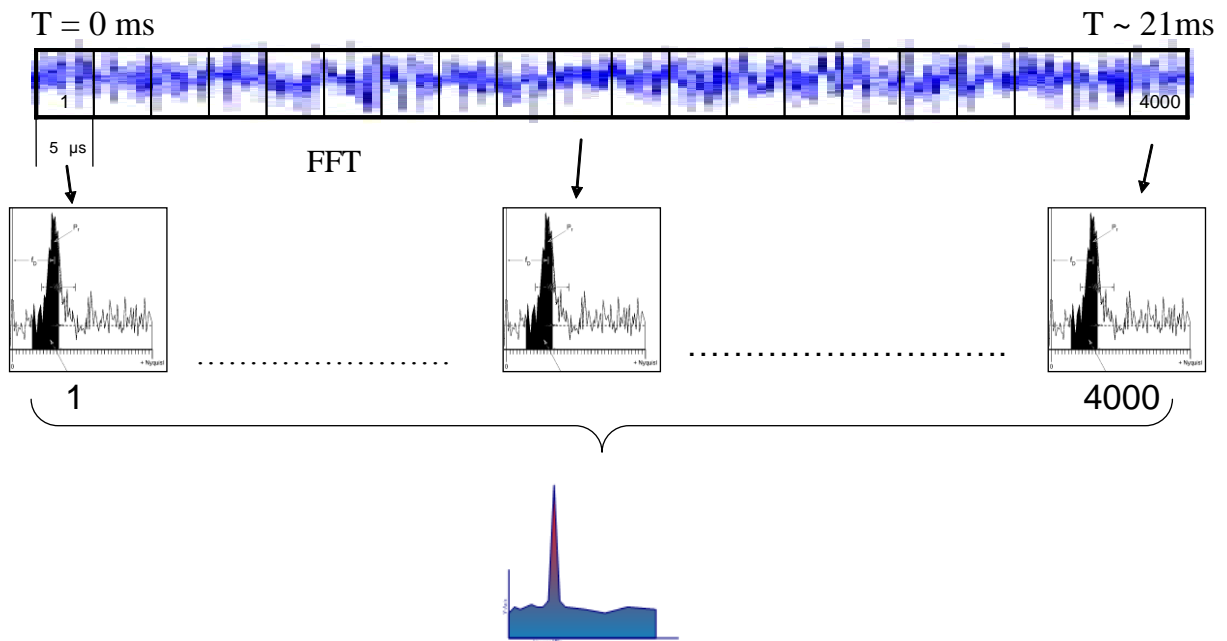


Рисунок 2.9 - Доплеровский спектр полезного сигнала в реальных условиях

Уточним, что спектр сигнала, показанный на рисунке 2.9, получен с помощью КДЛ ПЛВ-300 следующим образом. Объем одиночной выборки содержит 512 отсчетов временного сигнала. Длительность выборки по времени – 5.12 мкс. Полученный временной сигнал поступает на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). На выходе блока БПФ вычисляется квадрат модуля комплексного Фурье-спектра. Квадраты модулей спектров в серии объемом в 4096 выборок усредняются. Общая продолжительность одной серии съема данных ~21 мс. За период одного полного сканирования снимается 48 серий. На рисунке 2.10. представлен вид единичного и усредненного в серии доплеровского спектра полезного сигнала.



Усредненный спектр воспринимаемого приемником сигнала

Рисунок 2.10 - Схема обработки сигнала в единичном измерении

Анализ рисунка 2.9 также приводит к выводу, что для того, чтобы применить существующие методы определения максимума колоколообразной функции, необходимо учесть неравномерность спектральных характеристик фона.

В результате после определения центральной доплеровской частоты полезного сигнала в каждой точке сканирующей траектории, получается набор частот, характеризующих ветровое поведение воздушных масс на фиксированной высоте. Графически соответствующие этому набору частот значения радиальных скоростей показаны на рисунке 2.11.

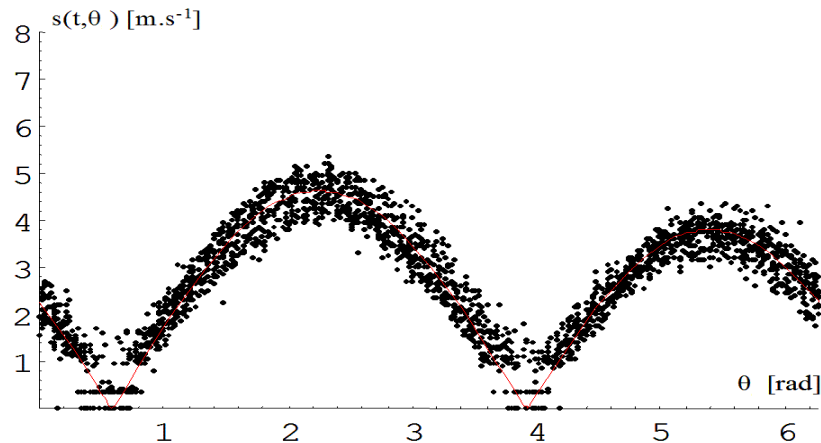


Рисунок 2.11 - Результат сканирования на фиксированной высоте

Линия зондирования описывает коническую поверхность, имеющую вертикальную ось и определенный угол раствора за заданное время. За один оборот измеряется, как правило, несколько десятков значений осевой или радиальной проекции скорости ветра.

Информация о доплеровских частотах или радиальных проекциях скорости ветра с каждого оборота запоминается в соответствующем архиве для последующей обработки. Количество оборотов бывает обычно несколько единиц, например, три. Методика выбора количества оборотов сканирования приведена в работе [16, 85].

Спектры осевых проекций помимо сигнальной составляющей также содержат шум, который в зависимости от атмосферных условий, может мешать выделению полезного сигнала. Пример наличия в спектре шумовых или ошибочных отсчетов показан на рисунке 2.12.

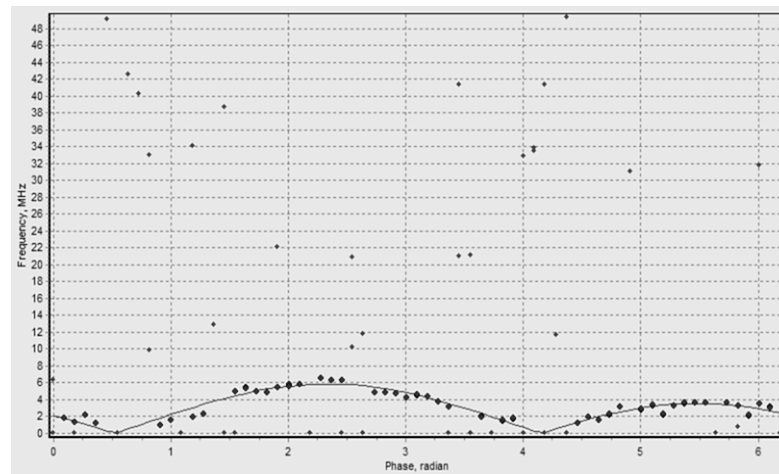


Рисунок 2.12 - Спектр полезного сигнала в совокупности с шумовыми или ошибочными отсчетами

Таким образом, в результирующий набор частот попадают нежелательные шумовые частоты, которые должны быть удалены до вычисления аппроксимирующей функции. Это повышает точность аппроксимации, и, соответственно, также и точность рассчитанных параметров скорости ветра. Для решения этой задачи необходимо разработать соответствующий алгоритм удаления шумовых или ошибочных выбросов из набора анализируемых частот.

Выводы по 2 главе

1. Ветровой когерентный доплеровский лидарный профилометр следует рассматривать, как датчик для получения информации о ветровых характеристиках и, в частности, о сдвиге ветра, в выбранных областях приземного слоя атмосферы в районе взлетно-посадочной полосы, среди совокупности элементов метеорологического информационного обеспечения системы поддержки принятия решений контрольно-диспетчерских пунктов при решении задачи управления воздушным движением с целью обеспечения максимально высокого уровня авиационной безопасности.

2. Ветровой когерентный доплеровский лидарный профилометр является совокупностью средств, включающих аппаратное и информационное обеспечение, основу которого составляют математическое, программно-алгоритмическое и организационно-методическое обеспечение. При разработке ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра целесообразным является выбор оптимального соотношения аппаратного и информационного обеспечения, так как внесение изменений в состав и структуру аппаратного обеспечения в период эксплуатации является сложной и трудоемкой операцией.

3. Математическая и программно-алгоритмическая части информационного обеспечения ПЛВ включают в себя математические модели используемой аппаратуры, объектов наблюдения, трассы распространения сигналов и полей, критерии качества, методы и алгоритмы обработки данных, базы данных и знаний, программное обеспечение.

4. В результате проведенных исследований построена математическая модель сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием в предположении, что за время сканирования ветровые характеристики атмосферы существенно не изменяются, а также разработана общая схема алгоритма обработки лидарного сигнала.

5. В соответствии с построенной математической моделью усредненный спектр лидарного сигнала содержит совокупность колоколообразного доплеровского спектра полезного сигнала и неравномерного спектра фона. Для определения параметров колоколообразного доплеровского спектра полезного сигнала необходимо разработать методы и алгоритмы его выделения из совокупности с неравномерным спектром фона.

6. В результате анализа математической модели доплеровского спектра полезного сигнала за полный оборот конического сканирования и результатов экспериментальных исследований выявлено наличие ошибочных

отсчетов. В связи с этим следует разработать методы и алгоритмы удаления ошибочных отсчетов из данных спектра, используемых в соответствующем алгоритме определения полного вектора скорости ветра.

3 МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ВЕТРОВОГО КОГЕРЕНТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЛИДАРНОГО ПРОФИЛОМЕТРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

В результате исследований, проведенных в предыдущей главе, для определения скорости и направления ветра на выбранной высоте сканирования после проведения преобразования Фурье необходимо рассмотреть методы и алгоритмы обработки гетеродинного сигнала на следующих этапах:

- выделение полезного доплеровского спектра из смеси с неравномерным спектральным фоном;
- определение параметров полезного доплеровского сигнала с получением оценки радиальной составляющей скорости ветра;
- отбраковка ошибочных или шумовых выбросов среди спектральных значений и определение полного вектора скорости ветра.

3.1 Выделение полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном

Исходными данными для решения задачи выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном служат осреднённые спектры на выходе АЦП лидарного профилометра. Отметим, что в реальных условиях доплеровский сигнал, как правило, относительно слабый и сильно зашумлен. В связи с этим требуется многократное его накопление с последующим усреднением. Вид этих осредненных спектров показан на рисунке 3.1. Целью алгоритма обработки осредненных спектров заключается в выделении полезного доплеровского сигнала, имеющего импульсный или колоколообразный вид, из смеси с неравномерным спектральным фоном.

Анализ кривой, представленной на рисунке 3.1. позволяет сделать следующий вывод. Осредненные спектры можно рассматривать как сумму трех составляющих, а именно полезного доплеровского сигнала, расположенного в любом месте по оси абсцисс, кривой, которая может иметь степенной характер, и аддитивного нормального шума.

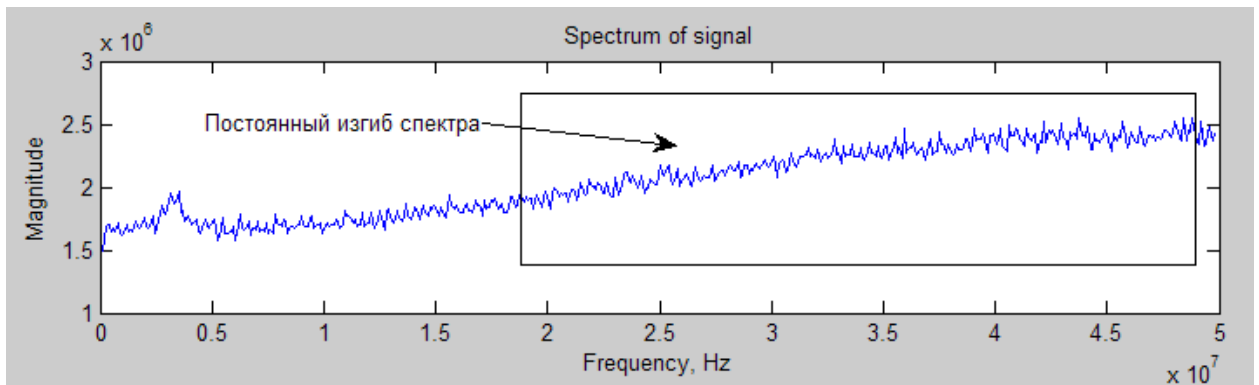


Рисунок 3.1 - Осредненные спектры, состоящие из совокупности полезного сигнала и неравномерного спектрального фона

Для того, чтобы можно было использовать известные методы определения параметров колоколообразной функции необходимо провести такую обработку осредненного спектра, в результате которой полезный доплеровский сигнал должен наблюдаться на фоне аддитивного стационарного шума. В связи с этим предлагается из анализируемого сигнала на первом этапе удалить полезный доплеровский сигнал. Известно, что в рассматриваемой ситуации одним из наиболее широко распространенных методов удаления точечных шумов и импульсной помехи является метод медианной фильтрации [86], относящийся к классу ранговых методов или алгоритмов.

Ранговые методы заключаются в том, что в случае анализа выборки, состоящей из N отсчетов, строится выборка порядковых статистик. Далее выбирается та порядковая статистика, ранг которой необходим для последующего исследования. Так для случая алгоритмов экстремальной

фильтрации из анализируемой выборки используется максимальное либо минимальное значение. Если же для последующего использования выбирается из выборки элемент, значение которого среди порядковых статистик занимает срединное положение, то приходим к алгоритму медианной фильтрации. Существуют и другие правила выбора соответствующих порядковых статистик, одно из которых приводит, например, к хорошо известному алгоритму скользящей эквализации. Очевидно, что ранговые алгоритмы являются нелинейными по своей сути и плохо поддаются теоретическому анализу.

В случае выбора модели представления полезного доплеровского сигнала импульсной помехой необходимо учитывать ее длительность. Это связано в первую очередь с тем, что для эффективного подавления импульсной помехи медианным фильтром скользящее окно должно иметь размер, более чем вдвое [86] превышающий длительность этой импульсной помехи. Выбор размера скользящего окна в начальный период эксплуатации лидарного профилометра определяется опытным путем, а затем исходя из данных, полученных посредством наблюдения за ветровыми характеристиками приземного слоя атмосферы в зоне ВПП в течение года. Данные о ветровых характеристиках, а, следовательно, и о ширине доплеровского спектра сигнала, отраженного от наблюдаемой зоны приземного слоя атмосферы, должны храниться в соответствующих базе данных и базе знаний контрольно-диспетчерского пункта аэропорта.

В результате применения медианной фильтрации к осредненному спектру S получается сглаженная кривая S' , вид которой показан на рисунке 3.2.

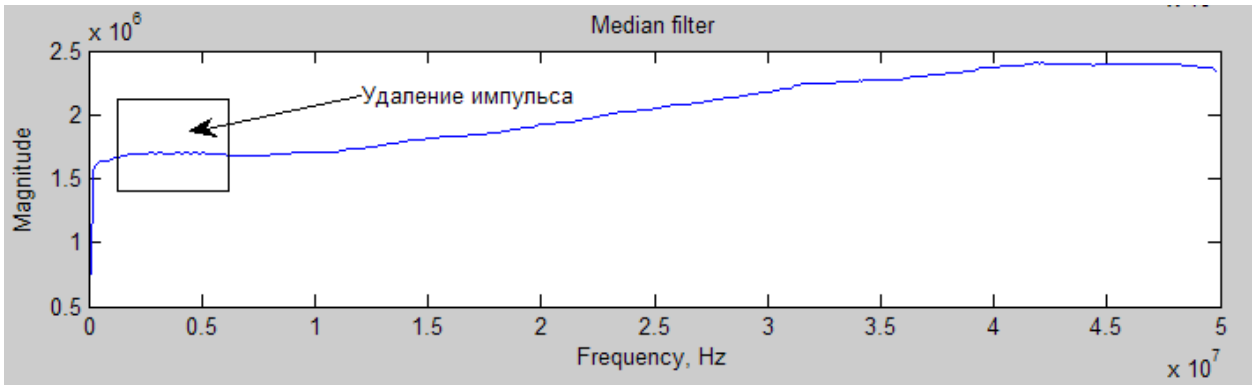


Рисунок 3.2 - Сглаженный медианным фильтром осредненный спектр

Для того, чтобы наблюдать сигнал на равномерном фоне, далее осуществляется нормировка осредненного спектра в соответствии со следующим выражением:

$$S_n = S / S',$$

Вид нормированного спектра показан на рисунке 3.3.

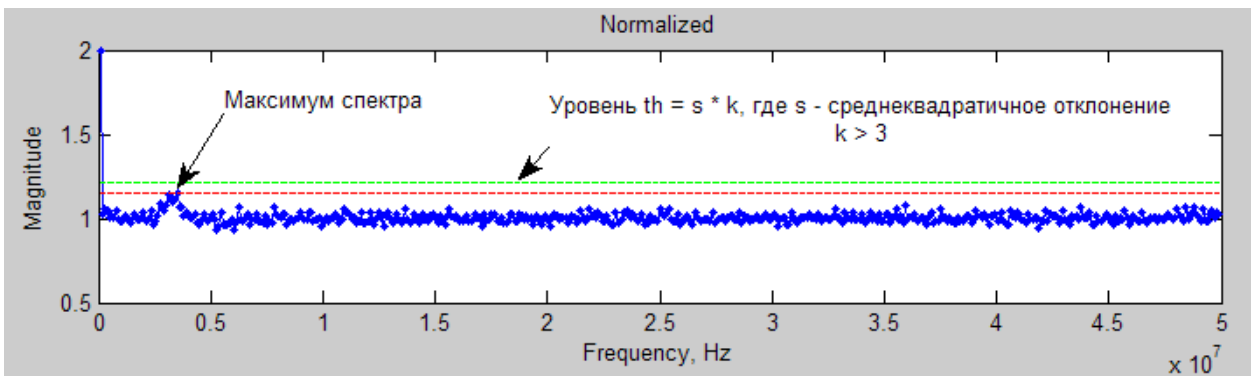


Рисунок 3.3 - Вид осредненного спектра после нормировки

Чтобы уменьшить влияние аддитивного шума осуществляется его сглаживание усредняющим фильтром в скользящем окне, размер которого существенно меньше длительности полезного доплеровского сигнала. Результат такого сглаживания S_n' показан на рисунке 3.4.

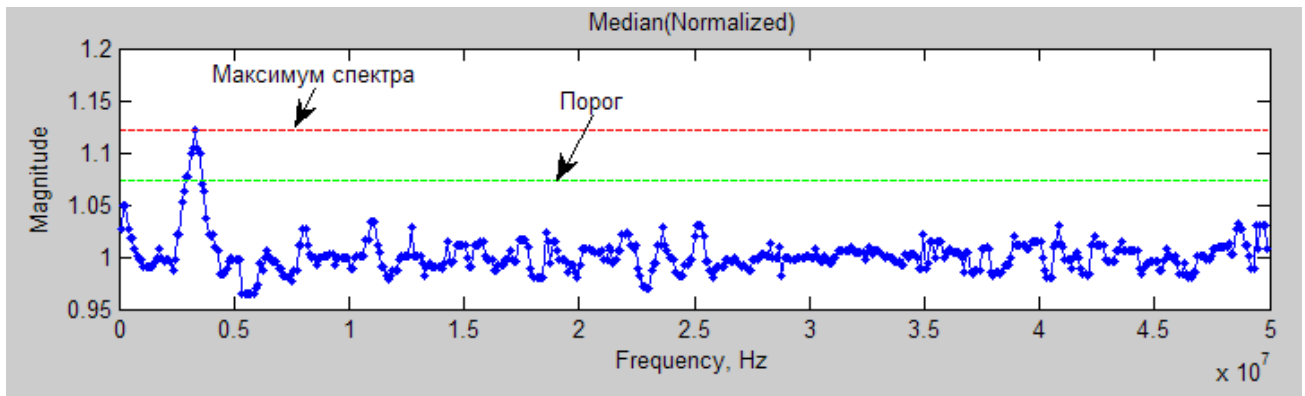


Рисунок 3.4 - Вид осредненного спектра после нормировки и сглаживания усредняющим фильтром в скользящем окне

Использование сглаживающего фильтра на основе локального усреднения в скользящем окне обусловлено тем, что он достаточно эффективен при подавлении аддитивных шумов. В свою очередь, как уже отмечалось, медианная фильтрация в скользящем окне широко используется для устранения импульсных или точечных шумов. В соответствии с тем, что аддитивные шумы, особенно при достаточно высоких отношениях сигнал/шум, существенно влияют на поведение младших разрядов числового представления анализируемых данных в двоичном коде, а импульсные шумы, в первую очередь, сказываются на старших разрядах числового представления анализируемых данных в двоичном коде, то для сглаживания сигналов в импульсных и аддитивных шумах в авторском свидетельстве на изобретение [87] впервые на концептуальном уровне предложен метод деления разрядной сетки с описанием реализующего его устройства. Основной недостаток данного устройства заключается в том, что сглаживание сигнала осуществляется только для скользящего окна четного размера.

В данной работе предлагается и используется метод деления разрядной сетки на этапе обработки осредненного спектра для одновременного удаления полезного доплеровского сигнала и подавления аддитивного шума в скользящем режиме в окне произвольного, то есть как четного, так и нечетного размера. Выбор размера окна, как для младших разрядов, так и для

старших разрядов разрядной сетки числового представления осредненного спектра является независимым. Соотношение количества младших и старших разрядов при делении разрядной сетки определяется уровнем аддитивного шума. После этой операции осуществляется нормировка спектрального сигнала без последующего сглаживания усредняющим фильтром. Таким образом, из общего алгоритма обработки исключается одна операция без ухудшения качества обработки. Вид спектрального сигнала после обработки методом деления разрядной сетки с использованием усредняющего и медианного фильтров и последующей нормировки аналогичен виду, представленному на рисунке 3.4.

Для определения оценки центральной частоты в полезном доплеровском сигнале предлагается осуществить над осредненным спектром, прошедшим через этапы нормировки и сглаживания, следующие операции:

- рассчитать математическое ожидание m спектра S'_n ;
- рассчитать среднеквадратичное отклонение σ_s спектра S'_n ;
- для последующего анализа в соответствии с методом трех сигма выбираются отсчеты спектра, удовлетворяющие соотношению:

$$S'_n(f) \geq k \cdot \sigma_s + m.$$

Коэффициент k задает порог чувствительности и в соответствии с методом трех сигма равен 3. Возможно увеличение этого коэффициента до 4. Порог, который определяется предыдущим соотношением в случае равенства, показан на рисунке 3.4 зеленой линией.

3.2 Методы определения центральной доплеровской частоты

Следующим этапом обработки после выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном в соответствии с блок-схемой обработки данных ПЛВ, показанной на рисунке 3.5., является определение центральной доплеровской частоты полезного доплеровского сигнала, линейно связанной с радиальной составляющей полного вектора скорости. С целью определения центральной доплеровской частоты наиболее широко используется метод определения центра тяжести полезного доплеровского сигнала или, другими словами, центроидный метод. Достаточно детально методы определения параметров колоколообразной функции и, в частности, параметров полезного доплеровского сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара рассмотрены в работах [20, 88, 89].

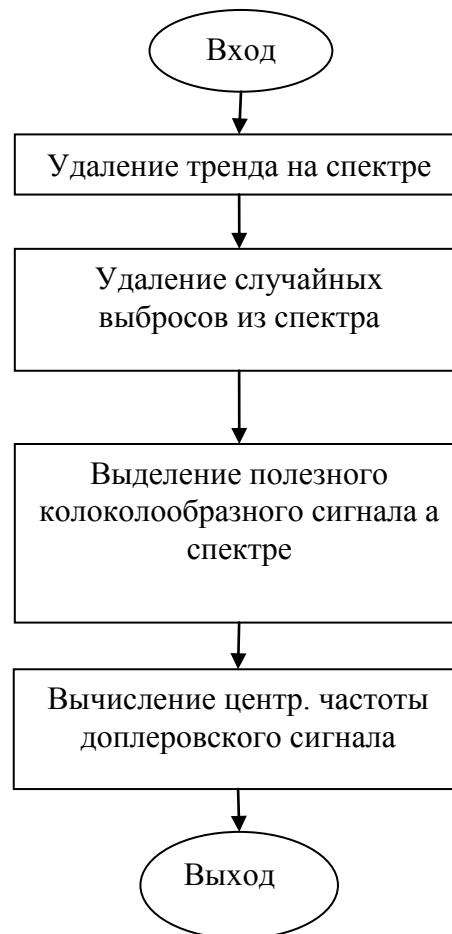


Рисунок 3.5 - Блок-схема алгоритма обработки сигнала

Прежде, чем приступить к рассмотрению методов определения параметров колоколообразной функции, рассмотрим один из подходов, позволяющих представить ее в аналитическом виде. В частности, для описания неискаженной шумами и помехами различной природы колоколообразной функции широко используется гауссоида, которая в аналитическом виде представляется в виде функции

$$f = k_a \varphi(x, x_m, \sigma), \quad (3.1)$$

где k_a – амплитудный коэффициент, $\varphi(x, x_m, \sigma)$ – функция Гаусса, описывающая известное гауссовское распределение

$$\varphi(x, x_m, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_m}{\sigma}\right)^2},$$

где x – координата по оси абсцисс, x_m – центр гауссовского распределения, характеризующий положение максимума колоколообразной функции, σ – дисперсия гауссовского распределения, характеризующая ширину колоколообразной функции.

Отметим, что максимум рассматриваемой колоколообразной функции f достигается в точке $x = x_{max}$ и равен

$$f_{max} = \frac{k_a}{\sigma\sqrt{2\pi}},$$

Очевидно, что наибольшая крутизна колоколообразной функции достигается в точках $x_1 = x_{max} - \sigma$ и $x_2 = x_{max} + \sigma$. При этом $x_2 - x_1 = 2\sigma$. Значение колоколообразной функции в этих точках равно

$$f_{1,2} = \frac{k_a}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}}.$$

При этом прямая, проходящая через точки максимальной крутизны рассматриваемой колоколообразной функции, описывается уравнением

$$y = f_{max} \cdot e^{-\frac{1}{2}}.$$

Для описания свойств широкого круга функций различной физической природы, в том числе многомерных, на практике повсеместно используется такой параметр, как центр тяжести. В ряде случаев метод поиска центра тяжести анализируемой функции получил название центроидного метода. Таким образом, при использовании центроидного метода предполагается, что координата максимума полезного доплеровского спектра совпадает с координатой его центра тяжести, то есть

$$x_{\max} = \frac{\sum_i x_i u_i}{\sum_i u_i}, \quad (3.2)$$

где x_i - координата, соответствующая i -ому отсчету рассматриваемой реализации доплеровского спектра, u_i - амплитуда сигнала i -ого отсчета этого спектра.

Анализ выражения (3.2) показывает, что центроидный метод прост, а, следовательно, при его реализации не требуется больших вычислительных затрат. Однако этот метод имеет и серьезный недостаток, заключающийся в его достаточно высокой чувствительности к шуму во входном сигнале. Кроме того центроидный метод позволяет провести оценку только одного параметра колоколообразной функции, а именно только оценку положения ее максимума. Среди других методов, позволяющих определять только положение максимума колоколообразной функции, можно назвать метод, основанный на использовании кубического сплайна [90].

В отличие от центроидного метода и метода с использованием кубического сплайна методы с использованием гауссовской аппроксимации [88] и порядковых статистик [89] позволяют определить как положение максимума, так и полуширину колоколообразной функции.

При аппроксимации отсчетов доплеровского спектра гауссоидой в работе [88] применялся метод, представленный в [91] для обработки брэгговских пиков. Для определения параметров гауссоиды использовался метод Ньютона в соответствии с критерием минимума среднеквадратичной

ошибки. В этом методе совокупность N экспериментальных точек $u(x_i)$ аппроксимируется колоколообразной функцией вида (3.1).

Для нахождения параметров колоколообразной функции гауссоидного вида используется итерационная процедура

$$\begin{bmatrix} k_a^{(k+1)} \\ x_m^{(k+1)} \\ \sigma^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{a0} \\ x_{m0} \\ \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta k_a^{(k)} \\ \delta x_m^{(k)} \\ \delta \sigma^{(k)} \end{bmatrix},$$

где k_{a0} , x_{m0} , σ_0 - «нулевые приближения», которые определяются каким-либо другим упрощенным методом. Для уточнения значений k_{a1} , x_{m1} , σ_1 к их нулевым приближениям определяются поправки δk_a^1 , δx_m^1 , $\delta \sigma^1$.

В общем случае в соответствии с методом Ньютона значения поправок к рассматриваемым параметрам a_i находятся из системы уравнений

$$\frac{\partial Q_L}{\partial \delta a_1} = 0, \quad \frac{\partial Q_L}{\partial \delta a_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial Q_L}{\partial \delta a_m} = 0,$$

где

$$Q_L = \sum_{i=1}^N \left(f_i + \frac{\partial f_i}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial f_i}{\partial a_2} \delta a_2 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial a_m} \delta a_m - u_i \right)^2 \rightarrow \min .$$

В результате получаем

$$A \cdot X = B,$$

где для колоколообразной функции гауссоидного вида

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \varphi_i^2 & k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} & k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} & k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \right)^2 & k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} & k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} & k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} \right)^2 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} \delta k_a \\ \delta x_m \\ \delta \sigma \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i - k_{a0} a_{11} \\ \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} - k_{a0} a_{21} \\ \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} - k_{a0} a_{31} \end{pmatrix},$$

$$\varphi_i = \varphi(x_i, x_{m0}, \sigma_0), \quad \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} = \frac{\partial \varphi}{\partial x_m} \Big|_{x_m=x_{m0}, x=x_i}, \quad \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} = \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\sigma_0, x=x_i}.$$

Количество итераций в соответствии с описанной процедурой проводится в соответствии с выбранным критерием. В частности проведение последующих итераций прекращается в случае, когда новые значения величин k_a , x_m , σ изменяются на величины, которые не превышают значений, меньшие установленных заранее. Процесс может быть остановлен также в случае, когда становится ясно, что приемлемое решение получить не удастся. В свою очередь в работе [88] показано, что для получения оценок положения максимума и полуширины полезного доплеровского спектра в ветровом когерентном доплеровском лидаре достаточно проведения двух-трех итераций. Метод гауссовской аппроксимации обеспечивает более высокую точность по сравнению с центроидным методом и методом с использованием кубического сплайна и позволяет одновременно проводить оценку трех параметров колоколообразной функции, но требует существенно больших вычислительных затрат.

Весьма перспективным является метод порядковых статистик [20, 89]. Суть этого метода заключается в том, что оценивание положения максимума в общем случае искаженной шумами и помехами дискретной колоколообразной функции определяется следующей последовательностью действий:

1. Осуществляется выбор максимального значения u_{max} вариационного ряда, соответствующего элементу u_l массива исходных данных.
2. Определяется прямая, задаваемая уравнением

$$y = U = u_{\max} \cdot e^{-\frac{1}{2}}.$$

3. Находятся элементы исходного числового ряда (порядковых статистик), удовлетворяющие неравенствам:

$$\begin{aligned} u_{m-1} < U < u_m < u_l = u_{\max}; \\ u_l = u_{\max} > u_n > U > u_{n+1} \\ \text{при } m \leq l \leq n. \end{aligned}$$

Выбор уровня $y=U$ обусловлен тем, чтобы в случае искажения колоколообразной функции аддитивными шумами вероятность превышения значений u_{m-1} и u_{n+1} над соответственно значениями u_m и u_n была минимальной. Далее на уровне $y=U$ определяются точки пересечения с колоколообразной функцией, значения которой интерполируются на интервалах (x_{m-1}, x_m) и (x_n, x_{n+1}) соответственно прямыми $y=a_1x+b_1$ и $y=a_2x+b_2$. Для этого производится решение следующих систем уравнений.

$$\begin{cases} y = U \\ y = a_1x + b_1 \end{cases}, \text{ где}$$

$$a_1 = \frac{u_m - u_{m-1}}{x_m - x_{m-1}}, \quad b_1 = u_{m-1} - \frac{u_m - u_{m-1}}{x_m - x_{m-1}} \cdot x_{m-1}$$

и

$$\begin{cases} y = U \\ y = a_2x + b_2 \end{cases}, \text{ где}$$

$$a_2 = \frac{u_{n+1} - u_n}{x_{n+1} - x_n}, \quad b_2 = u_n - \frac{u_{n+1} - u_n}{x_{n+1} - x_n} \cdot x_n$$

Из этих систем получаются оценки \hat{x}_1 и \hat{x}_2 , которые используются для оценки положения максимума колоколообразной функции в соответствии с выражением

$$\hat{x}_{\max} = \frac{\hat{x}_1 + \hat{x}_2}{2}.$$

Очевидно, что оценка полуширины колоколообразной функции определяется в соответствии с выражением

$$\sigma = \frac{\hat{x}_1 + \hat{x}_2}{2}.$$

Исследования, проведенные в работе [20], показали, что метод порядковых статистик по своей простоте не уступает центроидному. В то же время обеспечиваемая этим методом точность оценок центральной доплеровской частоты не уступает методу гауссовской аппроксимации и существенно выше, чем у центроидного метода.

3.3 Метод определения полного вектора скорости ветра

Для измерения скорости ветра на заданной высоте за один цикл осуществляется, как правило, три оборота сканирования. Четвертый оборот используется для определения направления ветра. За один оборот измеряется обычно несколько десятков значений радиальной проекции скорости ветра.

Наборы доплеровских частот полезного сигнала с каждого оборота объединяются в общий массив \vec{F} по принципу:

$$\begin{bmatrix} p(1,1) & p(1,2) & p(1,3) \\ p(2,1) & p(2,2) & p(2,3) \\ \dots & \dots & \dots \\ p(n,1) & p(n,2) & p(n,3) \end{bmatrix},$$

где n – число радиальных проекций за один оборот, а в качестве столбцов выступает номер оборота.

Спектры радиальных проекций помимо сигнальной составляющей также содержат шум, который в зависимости от атмосферных условий, может в меньшей или большей степени мешать выделению полезного сигнала. Таким образом, в результирующий набор частот попадают нежелательные шумовые

частоты, которые должны быть удалены до вычисления параметров аппроксимирующей функции. Это повышает точность аппроксимации, и, соответственно, точность определения параметров скорости ветра.

На рисунке 3.6. приведена блок-схема алгоритма удаления выбросов из набора частот. Для удаления выбросов из набора частот рассчитываются среднее значение (m) и среднеквадратичное отклонение (s) набора частот \vec{F} . Далее:

1. По порогу отсекаются все точки, амплитуда которых превышает заданный порог $t_p = k \cdot s + m$, где $k \approx 3$.

2. Оставшиеся точки \vec{P} (подмножество \vec{F}) передаются в алгоритм аппроксимации.

3. На основании результатов аппроксимации формируется вектор \vec{P}' и вычисляется вектор ошибки аппроксимации $\vec{E} = |\vec{P} - \vec{P}'|$. Если вектор \vec{E} содержит элементы, значение которых превышает три среднеквадратичных отклонения t_e , то соответствующие элементы исключаются из \vec{P} и алгоритм возвращается в начало пункта 3. Другими словами: для каждого $e_i > t_e$, исключаются p_i из \vec{P} и повторяется процедура аппроксимации (рисунок 3.7.). В случае успешного завершения алгоритма удаления выбросов вычисляются параметры гармонической функции.

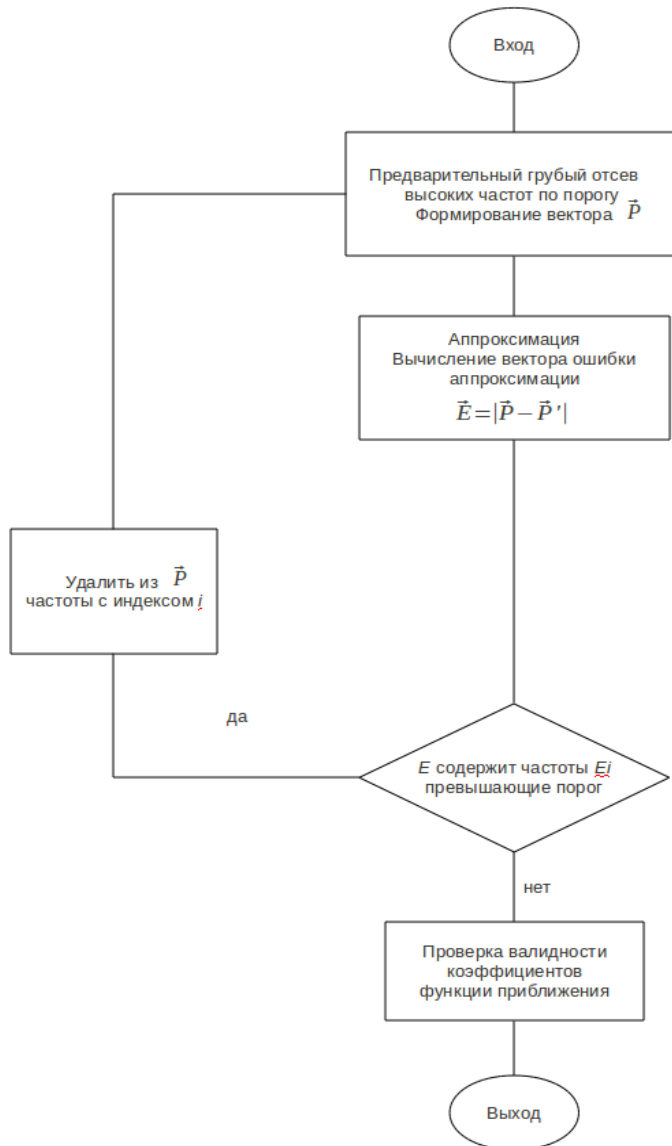


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритма удаления выбросов из набора частот

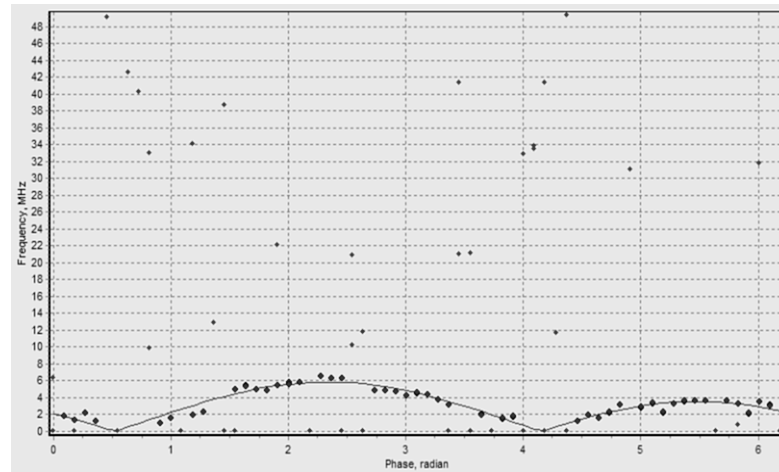


Рисунок 3.7 - Аппроксимация полученных данных гармонической зависимостью

Отдельно обрабатывается четвертый оборот сканирования, который предназначен для определения направления ветра. При анализе данных четвертого оборота учитывается сдвиг всего спектра на половину диапазона спектральной оси. Производится поиск положения пика колоколообразного импульса справа или слева от центральной частоты (25 МГц – середина спектральной шкалы). Алгоритм обнаружения пика аналогичен описанному алгоритму обработки спектров. К имеющейся информации о фазе сигнала добавляется 0 или 180 градусов в зависимости от взаимного положения, обнаруженного на четвертом кругу сканирования пика и центральной частоты спектра.

В соответствии с результатами предыдущей главы аппроксимирующая функция задается выражением:

$$V_r = a + b \cdot \cos(\theta - \theta_{\max}).$$

Без потери общности ее общий вид показан на рисунке 3.8.

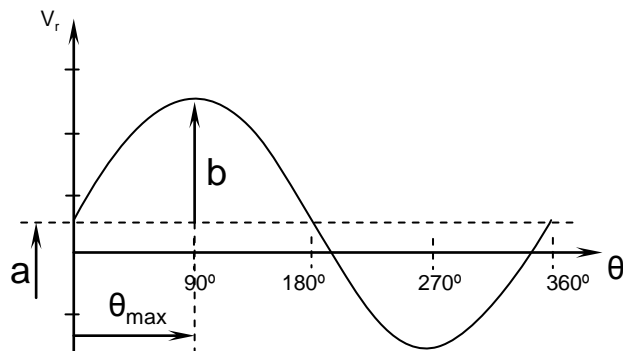


Рисунок 3.8 - Вид аппроксимирующей функции

Очевидно, выражение для вектора скорости имеет вид:

$$\vec{V} = (u, v, w) = \left(-b \frac{\sin \theta_{\max}}{\cos(\frac{\pi}{2} - \varphi)}, -b \frac{\cos \theta_{\max}}{\cos(\frac{\pi}{2} - \varphi)}, -\frac{a}{\sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)} \right).$$

Горизонтальная составляющая вектора скорости:

$$u_{\text{гор}} = \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{b}{\cos(\frac{\pi}{2} - \varphi)}.$$

Вертикальная составляющая вектора скорости:

$$w = -\frac{a}{\sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)}.$$

Как указывалось выше, в соответствии с рисунком 2.10. на практике имеем:

$$V_r = |a + b \cdot \cos(\theta - \theta_{\max})|.$$

Функция $V_r = y = F(x, a, b, c)$ зависит от переменной $x = \theta$ и трёх параметров a , b и $c = \theta_{\max}$.

Тогда для n измерений за один оборот сканирования можно записать следующее выражение:

$$\Phi(a, b, c) = \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)]^2,$$

где $x_i = \theta_i$, а $y_i = V_r(\theta_i)$.

Очевидно, для определения параметров a , b , c в соответствии с методом наименьших квадратов необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial a} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial c} = 0. \end{cases}$$

А именно:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_a(x, a, b, c) = 0, \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_b(x, a, b, c) = 0, \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_c(x, a, b, c) = 0. \end{cases}$$

Решение системы уравнений содержит искомые параметры a , b и c , по которым вычисляется горизонтальная и вертикальная составляющие вектора скорости ветра, а также его направление. Отметим, что методы, алгоритмы и сама процедура определения параметров a , b и c в рассмотренной выше постановке детально проработаны в диссертации Смалихо И.Н. [16].

Описанная серия измерений производится при фиксированной фокусировке приемо-передающего телескопа, соответствующей высоте, на которой производятся измерения. Для измерения вертикального профиля скорости ветра эта серия повторяется при нескольких различных фокусировках. Основным конечным результатом измерений является вертикальный профиль скорости ветра, измеренный в нескольких заранее заданных точках по высоте, привязанный к топографическим координатам. Кроме того, должно быть известно, как сориентированы оси x , y относительно направления на север (с точностью $0.2^\circ - 0.3^\circ$). Отображение вертикального профиля скорости ветра в зависимости от высоты на мониторе оператора ПЛВ-300 для примера показано на рисунке 3.9.

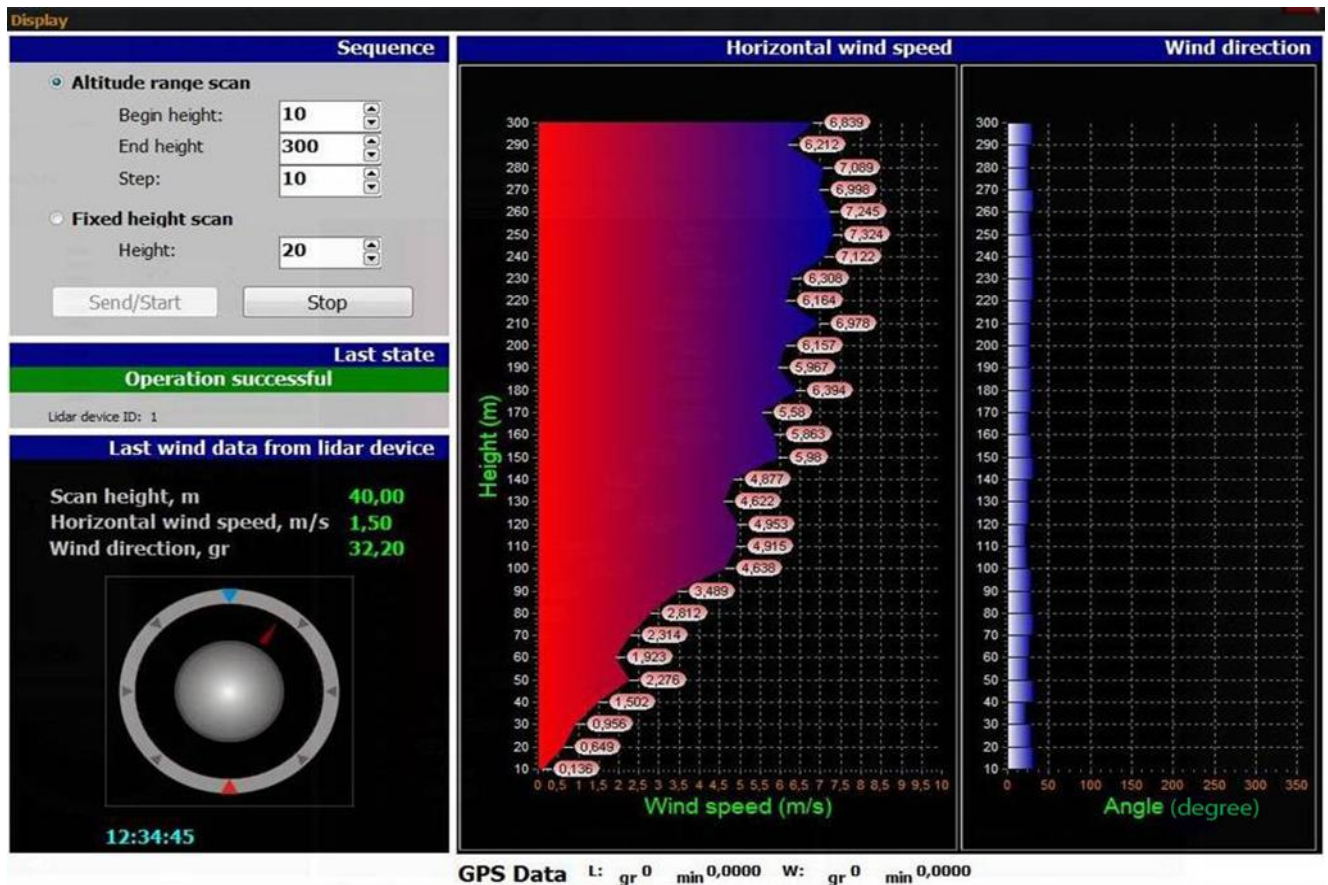


Рисунок 3.9 - Отображение на мониторе оператора данных о профиле ветра

Кроме того, дополнительную информацию содержит зависимость осевой проекции скорости ветра от угла зондирования на каждой высоте: $V_{||} = V_{||}(h)$. Обработка этой зависимости позволяет оценить уровень турбулентности.

В заключение следует отметить, что алгоритм хорошо зарекомендовал себя на практике. К его сильным сторонам относятся:

- относительная простота реализации;
- невысокие требования к ресурсам вычислительной системы;
- адаптивность к помехам внешних факторов и шуму аппаратуры.

Выводы по 3 главе

1. В рамках общей схемы обработки гетеродинного сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра рассмотрены методы и алгоритмы выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном. В основе этих методов лежат алгоритмы скользящего усреднения и скользящей медианной фильтрации с изменяемым размером скользящего окна. При использовании алгоритма медианной фильтрации обоснованным является то, что для эффективного подавления импульсной помехи скользящее окно должно иметь размер, более чем вдвое превышающий длительность этой импульсной помехи, то есть колоколообразной функции, которая описывает полезный доплеровский сигнал.

2. Наряду с последовательным применением алгоритмов скользящей медианной фильтрации и локального усреднения на основе концептуального подхода, связанного с разделением разрядной сетки при цифровом представлении анализируемого спектрального сигнала, предложен метод одновременного сглаживания данных, представленных старшими разрядами, алгоритмом скользящей медианной фильтрации, а данных, представленных младшими разрядами, алгоритмом скользящего локального усреднения. Соотношение количества старших и младших разрядов при делении разрядной сетки определяется уровнем отношения сигнал/шум и свойствами анализируемого сигнала.

3. Показано, что после обработки спектрального сигнала сглаживающими алгоритмами и выделения полезного доплеровского сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном, следует проводить операции нормировки и пороговой обработки с целью устранения случайных выбросов.

4. Показано, что при определении параметров колоколообразной функции используются в первую очередь такие методы, как центроидный, гауссовской и сплайн аппроксимации, а также порядковых статистик.

Наиболее простым и широко используемым является центроидный метод, который, позволяет проводить оценку только положения максимума колоколообразной функции. С точки зрения простоты реализации и достаточно высоких точностных характеристик при определении оценок не только положения максимума колоколообразной функции, но также и ее ширины, наиболее перспективным представляется метод порядковых статистик.

5. Завершающим этапом в общей схеме обработки гетеродинного сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра является отбраковка ошибочных или шумовых выбросов среди спектральных значений, соответствующих положению максимума полезного доплеровского сигнала, и определение полного вектора скорости ветра по данным нескольких оборотов сканирования атмосферы на выбранной высоте методом наименьших квадратов.

6. Определение направления скорости ветра предлагается осуществлять аппаратным методом за счет изменения частоты опорного сигнала на известную величину. В этом случае к имеющейся информации о фазе сигнала добавляется 0 или 180 градусов в зависимости от взаимного положения, обнаруженного на выбранном обороте сканирования пика и центральной частоты полезного доплеровского спектра.

7. Предложенная общая схема и соответствующая ей методика обработки гетеродинного сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра характеризуется относительной простотой реализации, невысокими требованиями к ресурсам вычислительной системы и адаптивностью к помехам внешних факторов и шуму аппаратуры.

4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВЕТРОВОГО ЛИДАРНОГО ПРОФИЛОМЕТРА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

4.1 Описание ветрового лидарного профилометра

В качестве экспериментальной установки, на которой были отработаны предложенные в работе методы и алгоритмы обработки информации, использовался опытный образец ветрового лидарного профилометра с монитором оператора ПЛВ-300, разработанный в НПП «Лазерные системы».

Ветровой лидар ПЛВ-300 представляет собой лазерный доплеровский анемометр на основе безопасного для глаз лазера непрерывного типа с коническим сканированием оптической оси приемо-передающего телескопа, отклоненной на 22° относительно вертикали и возможностью изменения дистанции фокусировки.

Использувавшийся для проведения исследований экспериментальный образец ветрового лидарного профилометра предназначен для оперативного дистанционного определения направления вектора и величины скорости воздушного потока на различных высотах, а также передачи полученных данных с помощью средств связи на компьютер оператора для дальнейшего анализа. Внешний вид ветрового лидарного профилометра ПЛВ-300 в САПР и реальном исполнении показан соответственно на рисунках 4.1 и 4.2, а его основные технические характеристики представлены в таблице 4.1.

Ветровой лидар имеет модульную конструкцию, и состоит из трех основных модулей, соединенных между собой механическим способом и имеющих электронные и оптические каналы связи:

- сканирующий модуль;
- модуль управления и обработки сигнала;
- модуль автономного электропитания и опор.

Каждый из модулей предназначен для выполнения определенных функций и состоит из нескольких подсистем. Соединение отдельных модулей осуществляется достаточно легко, что позволяет быстро привести лидар из походного положения в рабочее состояние. Внутренние полости модулей изолированы друг от друга.

Таблица 4.1 - Технические характеристики ветрового когерентного лидарного профилометра ПЛВ-300

№	Параметр	Значение
1.	Максимальная высота измерений	не менее 300 м
2.	Минимальная высота измерений	не более 3 м
3.	Максимальная скорость ветра	38 м/с
4.	Минимальная скорость ветра	0,2 м/с
5.	Погрешность измерения скорости ветра	$\pm 0,1$ м/с
6.	Погрешность измерения направления ветра	$\leq 0.5^\circ$ при ≥ 5 м/с, $t \leq 4$ с $\leq 1^\circ$ при 2...5 м/с, $t \leq 4$ с $\leq 1^\circ$ при 1 м/с, $t \leq 12$ с
7.	Длина волны лазерного излучения	1550–1570 нм
8.	Рабочая температура	$-40^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$
9.	Режим работы	Круглосуточный, всепогодный
10.	Температура хранения	$-50^\circ\text{C} - +60^\circ\text{C}$
11.	Время выхода на режим	не более 20 мин 10 мин при -40°C 1 мин при $0...30^\circ\text{C}$ 5 мин при $+40^\circ\text{C}$ 20 мин при $+50^\circ\text{C}$
12.	Общий вес (не включая вес батарей)	≤ 70 кг
13.	Время сканирования на фиксированной высоте	4 сек

14.	Разрешение по высоте	$\leq \pm 10\%$ при высоте измерения 200 м
15.	Точность определения географических координат	Определяется параметрами используемой GPS – системы, но не менее 15м.
16.	Возможности удаленного управления (RS-485, Ethernet)	- Считывание результатов измерений (Со считыванием телеметрических данных) - Задание режимов работы
17.	Продолжительность работы	При питании от батарей: Не менее 2 часа при $t > - 20^{\circ}\text{C}$; при питании от сети DC24В $\pm 4\text{В}$ или AC220В 50Гц – без ограничения
18.	Место установки	Должны быть предусмотрены приспособления для установки и крепления на неподготовленной площадке
19.	Транспортировка	Система в специальной таре транспортируется по грунтовой дороге на расстояние не менее 300 км
20.	Максимальные габариты, мм	D300 x 800 (без батарей)
21 .	Батарея	Может быть состыкована с корпусом устройства, максимальные габариты батарей не более D280 x 400 мм

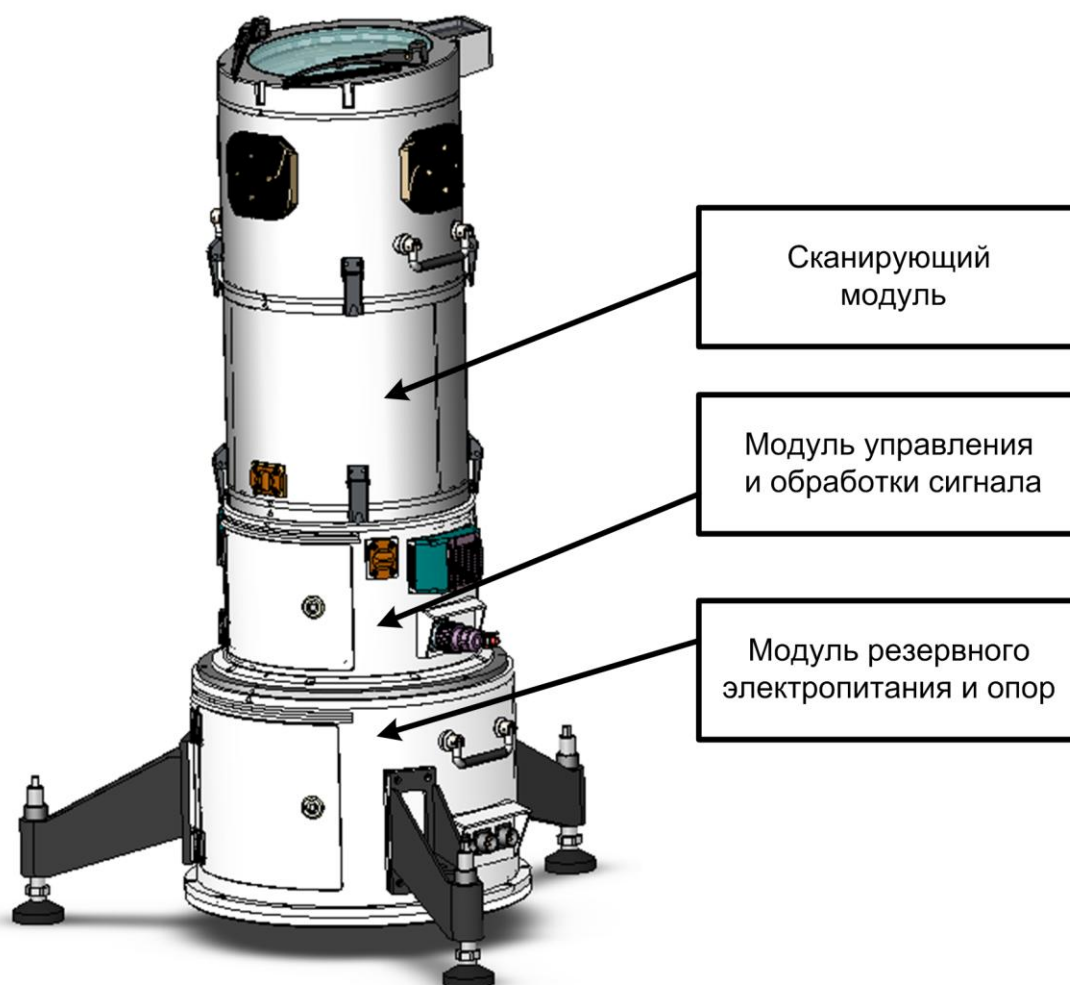


Рисунок 4.1 - Внешний вид лидарного профилометра и расположение основных модулей, сформированные в САПР



Рисунок 4.2 - Внешний вид опытного образца ПЛВ-300

Структурная схема ветрового лидарного профилометра представлена на рисунке 4.3. В данной схеме приведены все основные элементы профилометра ПЛВ-300, а также их расположение по модулям. Приведем состав каждого из модулей лидарного профилометра.

Оборудование, размещаемое в сканирующем модуле.

Модуль сканирующий предназначен для обеспечения сканирования воздушного пространства лазерным лучом по заданной траектории с заданной частотой, а также для приема обратно рассеянного сигнала.

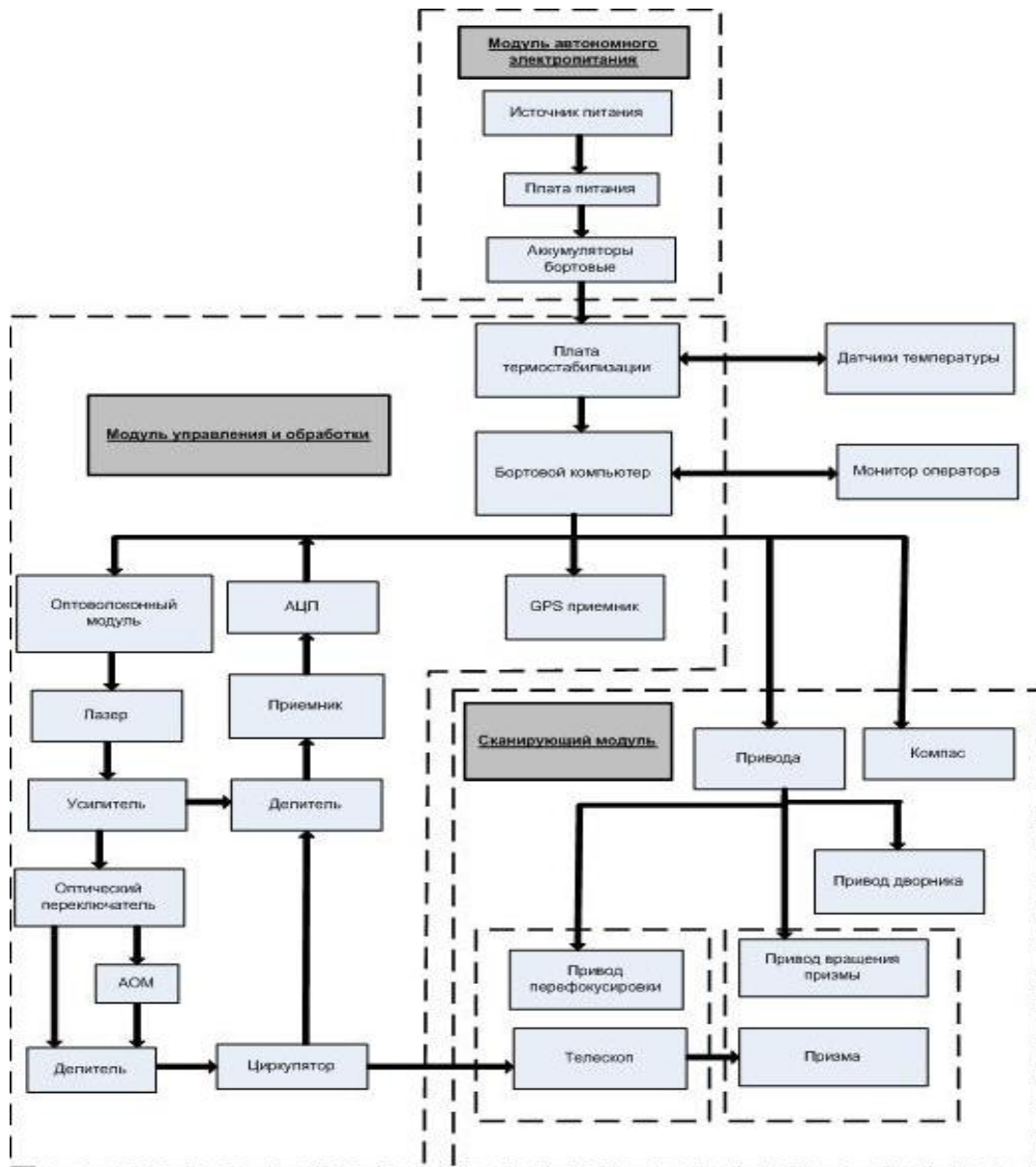


Рисунок 4.3 - Структурная схема ПЛВ-300

Модуль содержит следующие элементы:

- телескоп;
- привод вращения призмы;
- привод перефокусировки;

- привод дворника;
- призма;
- компас.

Оборудование, размещаемое в модуле управления и обработки.

Модуль управления и обработки сигнала предназначен для размещения оптоэлектронного оборудования, системы управления и сбора данных, а также системы термостабилизации. Модуль расположен на модуле автономного электропитания. Сверху к модулю крепится сканирующий модуль. Между узлами сканера и управления помимо информационных электронных каналов связи существует оптоволоконный канал для вывода лазерного излучения из волоконного усилителя в приемо-передающий телескоп, расположенный в модуле сканирования.

В модуле управления и обработки размещены следующие оптические и электронные компоненты лидара:

- плата термостабилизации;
- бортовой компьютер;
- оптоволоконный модуль (лазер, усилитель, оптический переключатель, делители, АОМ, циркулятор);
- приемник;
- АЦП;
- GPS приемник.

Оборудование, размещаемое в модуле автономного питания.

Модуль автономного электропитания предназначен для размещения в нем аккумуляторных батарей и источника питания. В нем имеются регулируемые по высоте опоры, позволяющие устанавливать модуль на неподготовленной площадке.

Модуль содержит следующие элементы:

- источник питания;

- плата питания;
- аккумуляторные батареи.

Конструкция корпуса модуля обеспечивает возможность доступа к расположенным внутри устройствам и узлам.

Функционирование ветрового лидарного профилометра осуществляется следующим образом.

При подаче питания в модуль автономного электропитания плата питания, отвечающая за подачу питания на внутренние устройства ПЛВ, подает питание на плату термостабилизации, которая опрашивает датчики температуры. Если температура внутри ПЛВ не удовлетворяет температурам работы устройства, включается система термостабилизации, и температура нагнетается до рабочей.

После этого подается питание на бортовой компьютер и запускается необходимое для работы программное обеспечение. Затем запускается процесс подачи питания на оставшиеся бортовые устройства и их опрос.

Функциональная схема приемо-передающей системы лидарного профилометра показана на рисунке 4.4.

В соответствии с рисунком 4.4 излучение задающего лазерного генератора (1) выходной мощностью порядка 10 мВт поступает в эрбиевый волоконный усилитель (EDFA) (2) для усиления до необходимого уровня. Усиленное излучение делится пассивным оптоволоконным делителем (3) в соотношении 1% на 99%. Меньшая часть излучения используется в качестве опорного излучения гетеродина, которое поступает на активный оптоволоконный переключатель (OS) (6), который обеспечивает два режима измерения скорости ветра: с измерением знака и без измерения. В случае измерения знака проекции скорости оптический переключатель включается таким образом, что излучение направляется в акустооптический модулятор (АОМ) (7), который обеспечивает частотный сдвиг излучения на 25 МГц. Сдвинутое по частоте излучение направляется по оптоволоконным линиям на объединитель (8). При измерении скорости без знака проекции скорости ветра оптический переключатель направляет излучение напрямую в объединитель. Затем излучение направляется в оптоволоконный

смеситель (9), на котором суммируется с рассеянным излучением из атмосферы. После смешения опорного излучения с излучением приходящим из атмосферы излучение попадает на балансный гетеродинный приемник (10).

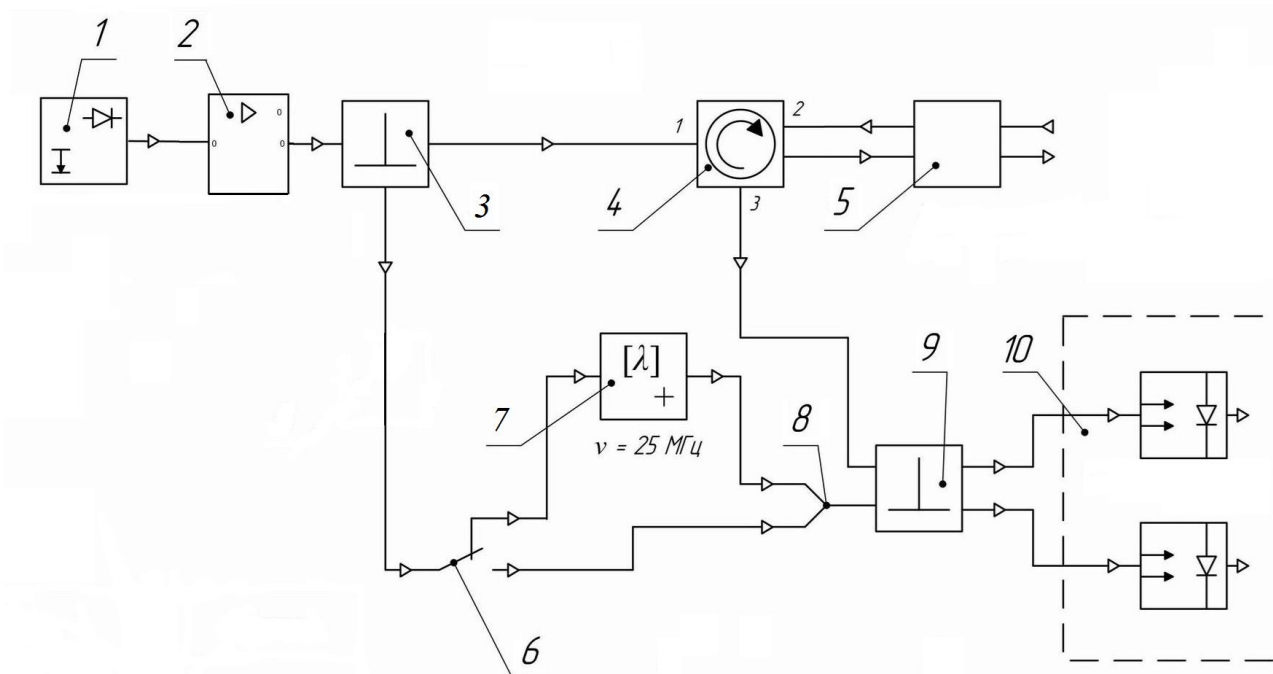


Рисунок 4.4 - Функциональная схема приемо-передающей системы ПЛВ-300

Другая часть излучения после первого делителя (99%) поступает через циркулятор (4) в приемо-передающий телескоп (5). С помощью привода перефокусировки излучение фокусируется на заданной дистанции, которая определяет высоту измерения вектора скорости ветра. Сканирование пространства по азимуту осуществляется с помощью призмы, вращаемой приводом вращения. После смешения опорного излучения с излучением, приходящим из атмосферы, на оптоволоконном смесителе (9) излучение попадает на балансный гетеродинный приемник (10).

Аналоговый сигнал, получаемый на выходе приемника, преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой сигнал, который поступает в бортовой компьютер для дальнейшей обработки с помощью алгоритма обработки данных.

4.2 Система управления и сбора данных

Система управления и сбора данных ветрового лидара представляет собой специализированный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для управления исполнительными устройствами лидара, сбора информации и последующей обработки результатов с целью решения задачи дистанционного определения параметров ветра в заданном пространстве. Программное обеспечение системы управления и сбора данных (СУСД) выполнено в соответствии со структурной схемой СУСД приведенной на рисунке 4.5.

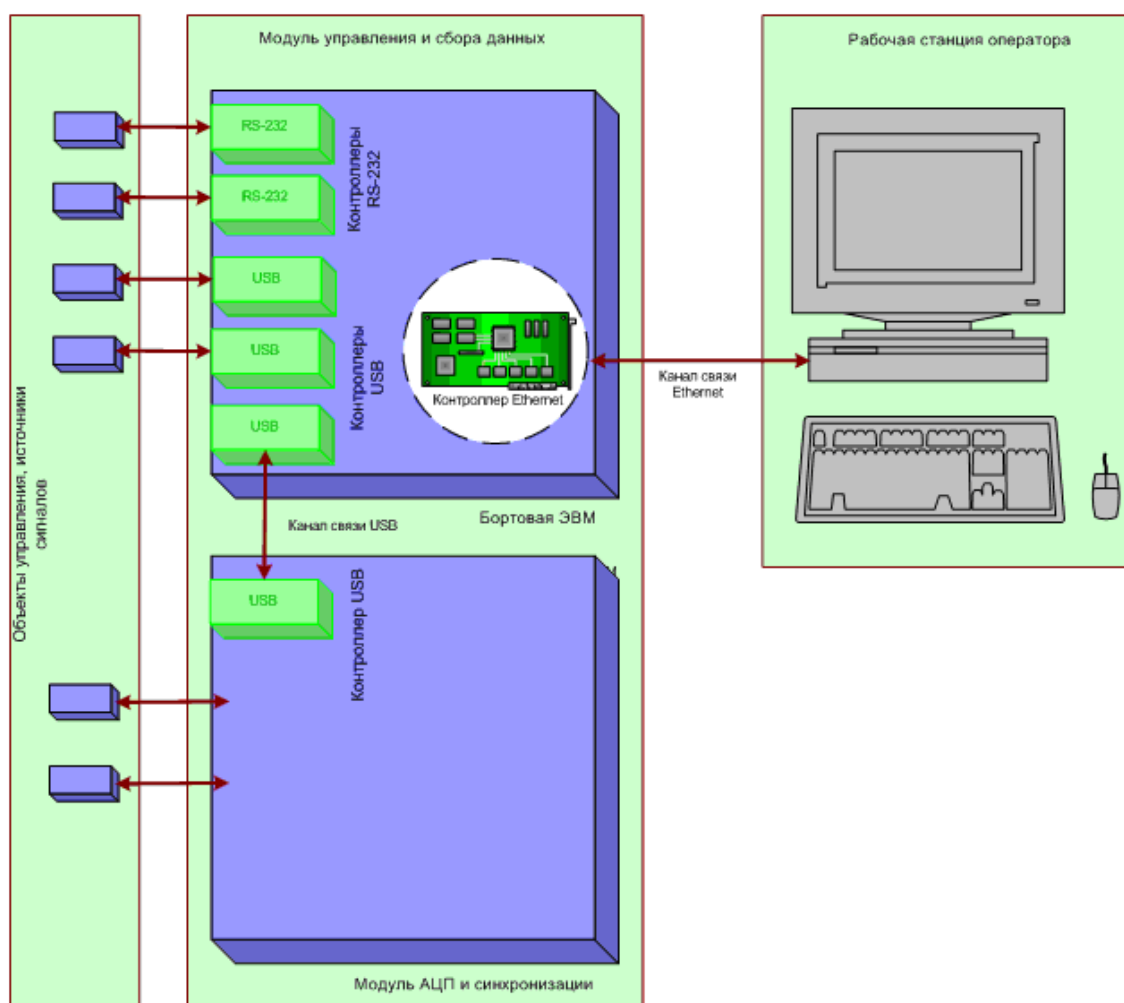


Рисунок 4.5 - Структурная схема системы управления и сбора данных

Как показано на структурной схеме, СУСД имеет двухуровневую архитектуру и состоит из модуля управления и сбора данных, связанного Ethernet каналом с рабочей станцией оператора.

Модуль управления и сбора данных СУСД реализован на базе электронной вычислительной машины (ЭВМ) имеющей PC-архитектуру, взаимодействующую с комплексом специализированных контроллеров, датчиков и исполнительных устройств посредством USB и RS-232 каналов связи.

Функциями модуля управления и сбора данных СУСД являются опрос датчиков, управление исполнительными устройствами, отработка циклограмм и накопление данных во время эксперимента с последующей их передачей рабочей станции оператора.

Рабочая станция оператора предназначена для отображения информации о состоянии установки, управления экспериментом со стороны оператора и обработкой полученных в ходе работы данных.

Оператор рабочей станции может контролировать состояние подсистем СУСД на всех фазах проведения эксперимента и принимать решение о возможности начала эксперимента и о необходимости его прекращения.

Типовой алгоритм работы лидарного профилометра

Производится несколько тестов на нескольких высотах, например: 25, 50, 100, 150, и 200 метров. На каждой высоте определяется направление скорости ветра, его величина, а также вычисляются стандартные отклонения измеряемых величин. Высоты измерений следует выбирать с учетом особенности функционирования непрерывного доплеровского лидара, заключающейся в том, что измерительный объем увеличивается в соответствии с квадратичной зависимостью от высоты фокусировки.

Высотный профиль вектора скорости ветра измеряется по трем проекциям частотного сдвига зондирующего излучения при отражении от атмосферного аэрозоля. Частотный сдвиг регистрируется по смещению частоты биений при гетеродинном приеме в когерентном доплеровском лидарном профилометре.

Как уже указывалось выше, ключевым предположением метода является допущение о неизменности вектора скорости на заданной высоте во всех направлениях зондирования в течение всего цикла измерений и малости

вертикальной проекции. Это означает, что метод хорошо работает по измерению скорости относительно стабильных горизонтальных воздушных потоков. В первую очередь это касается приземного слоя, в котором неоднородности рельефа местности оказывают существенное влияние на неоднородность вектора скорости ветра в горизонтальном направлении.

Сканирование на каждой выбранной высоте осуществляется в течение 4–х секунд со скоростью 1 оборот в секунду. В течение трех секунд производится съем данных без изменения частоты опорного генератора, один оборот делается с частотным сдвигом, для измерения знака. Направление вектора скорости ветра на одной высоте вычисляется по результатам четырех измерений. Таким образом, в течение 4-х секунд получается одно измерение на одной высоте. Для статистической обработки полученных данных измерения на одной высоте проводятся неоднократно.

После приема модулем команды «Старт» от управляющей ЭВМ на контроллер двигателя поворотной платформы подается команда на запуск двигателя. При этом выделяется время на разгон и стабилизацию скорости вращения поворотной платформы. Датчик полного оборота возвращает модулю синхронизации сигнал о завершении одного сеанса измерений. Во время начала каждого четвертого сеанса измерений в модуле синхронизации вырабатывается сигнал для включения акустооптического модулятора и подается сигнал включения волоконно-оптического переключателя. Далее производится последний сеанс измерений в соответствии с временной диаграммой работы лидарного профилметра, показанной на рисунке 4.6.

Во время каждого сеанса измерений аналоговый сигнал с фотоприемника поступает на вход АЦП, где происходит его оцифровка со скоростью 100 млн. выборок в секунду. Далее оцифрованный сигнал подвергается математической обработке и передается в бортовую ЭВМ. Из бортовой ЭВМ обработанные данные по соответствующему запросу по каналу Ethernet (либо RS-485) передаются в ЭВМ оператора.

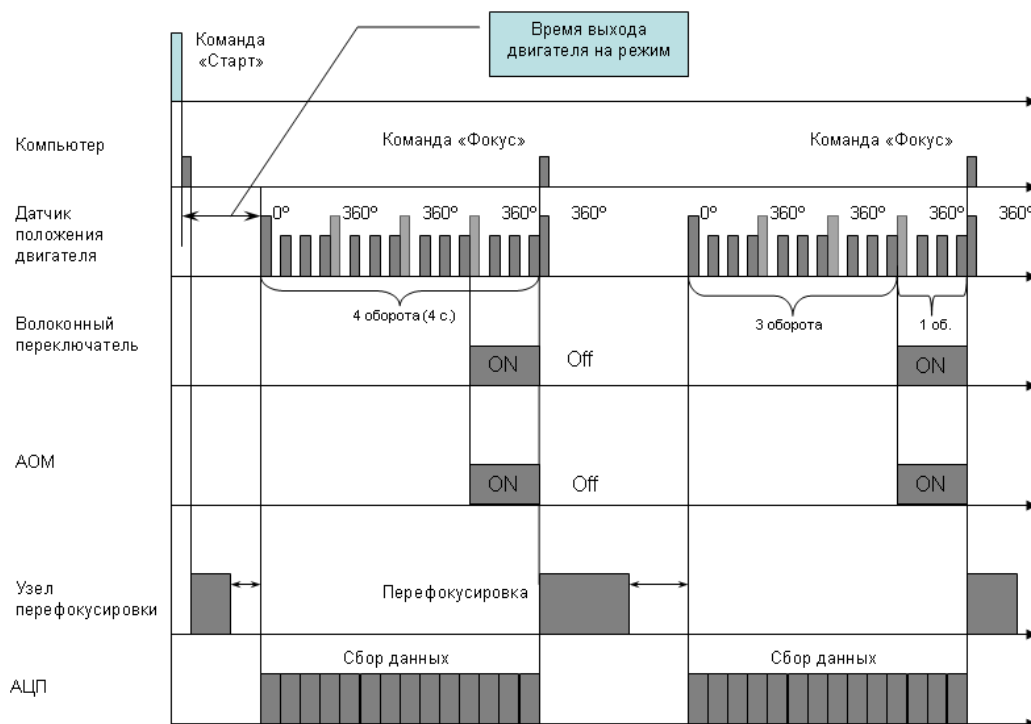


Рисунок 4.6 - Временная диаграмма работы лидара

После проведения каждого цикла измерений с бортовой ЭВМ на модуль синхронизации и АЦП поступает команда «ФОКУС». По этой команде происходит перефокусировка сканирующего модуля. Для этого на контроллер двигателя узла фокусировки с модуля синхронизации приходит команда включения двигателя, и происходит перефокусировка объектива сканирующего модуля на заданную позицию с контролем по датчику положения. Далее начинается новый цикл измерений.

4.3 Программно-алгоритмическое обеспечение ветрового лидарного профилометра в системе метеобеспечения и обработка экспериментальных данных

Клиентская метеорологическая часть программного обеспечения (ПО) профилометра (далее «метео-клиент») предназначена для удаленного выполнения процедур запуска и остановки профилометра, съема, обработки и визуализации сигнала от измерителя. Данная часть ПО используется для подготовки и запуска циклограмм и отображения таких конечных результатов работы, как информация о параметрах ветра и вертикальном сдвиге ветра с распределением по высотам в выбранном диапазоне сканирования. Кроме того с помощью программы «метео-клиент» осуществляется запись информации о техническом состоянии оборудования и о действиях оператора архивирования и хранения всей информации в памяти компьютера.

Основные функции клиентской части ПО заключаются в том, чтобы:

- отображать ветровой режим на аэродроме: высотный профиль скорости и направления ветра с цветовым кодированием опасных участков со сдвигом ветра;
- отображать текущие показания лидара, получаемые от измерителя: данные о скорости и направлении ветра для заданного среза высоты;
- вычислять значения сдвига ветра по данным о величине и направлении скорости, полученным от измерителя, и визуализировать эти значения на средствах отображения;
- выполнять архивирование, каталогизацию и хранение полученной информации о параметрах ветра, техническом состоянии оборудования и действиях оператора.

На рисунках 4.7-4.9 показаны варианты отображения необходимой для оператора информации на мониторе компьютера.

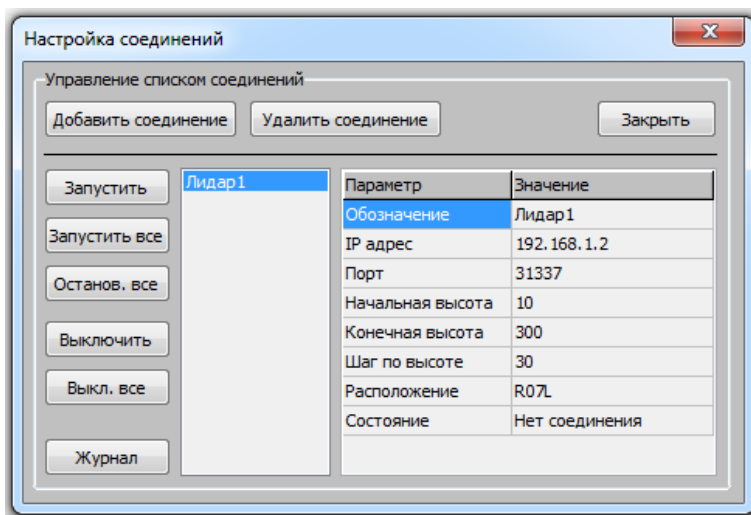


Рисунок 4.7 - Диалоговое окно для дистанционного управления режимами сканирования профилометра

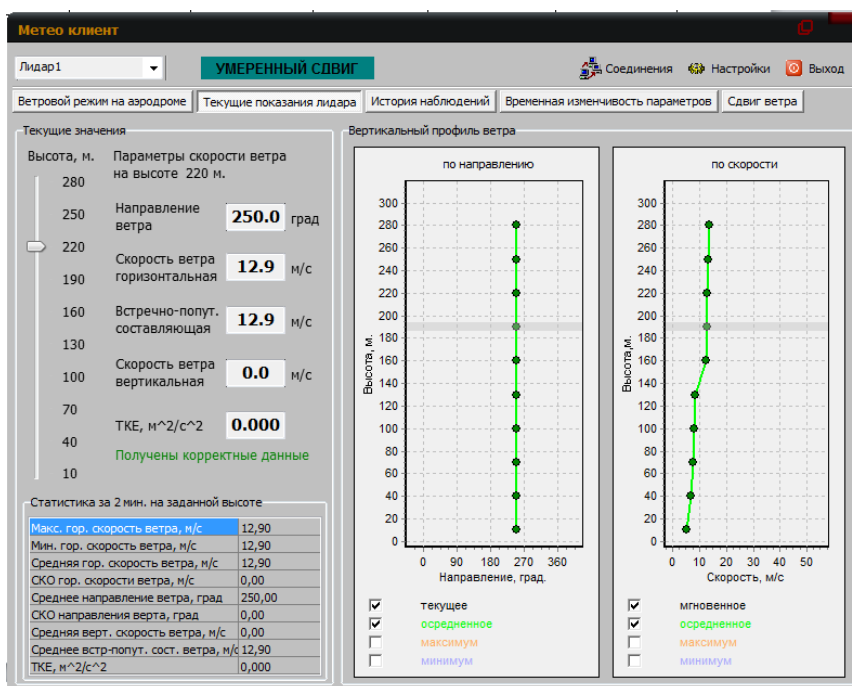


Рисунок 4.8 - Отображение на мониторе оператора данных о профиле ветра, которые поступают от профилометра после его дистанционного запуска

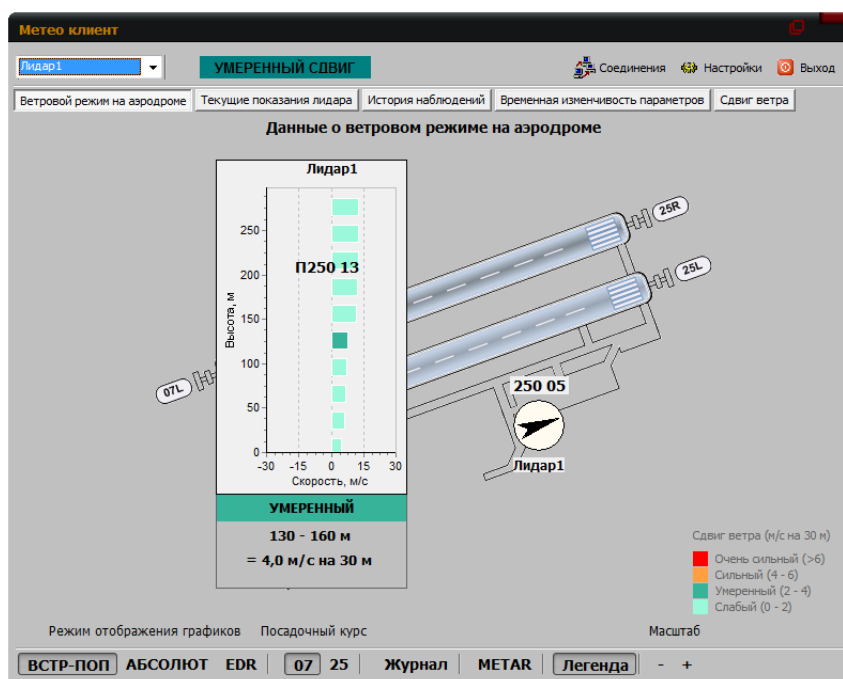


Рисунок 4.9 - Вывод данных с заданным округлением на мониторе оператора

Проверка диапазона и погрешности измерения профилометром скорости и направления ветра в диапазоне высот от 3 м до 300 м с задаваемой кратностью (10-100 м) производилась в процессе сертификационных испытаний на базе измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун».

Статистическая обработка полученных результатов производилась с помощью программы для обработки результатов наблюдения RUS.САЦН.11700-01 - WL CLIENT в операционной системе Microsoft Windows XP Professional. Для каждого цикла измерений на одной высоте определялись такие характеристики, как математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение, а также количество экспериментов, в которых данные измерений превышают допустимый интервал погрешностей.

Проверка высоты измерений и кратности изменения высоты на базе измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун» осуществлялась путем сравнения данных, полученных от датчиков, установленных на рабочих уровнях мачты ВММ-310, и результатов измерений профилометра на

соответствующих высот. Точность позиционирования на заданной высоте подтверждается хорошим совпадением результатов измерений.

Комплекс ВММ-310 оснащен ультразвуковыми анемометрами Model 81000/81000V и датчиками измерения параметров ветра типа МК-15.

Технические параметры ультразвукового анемометра Young Model 81000V:

Диапазон измерений:

- скорость ветра: 0...40 м/с;
- направление ветра: 0.0...359.9°.

Погрешность измерений:

- скорость ветра: $\pm 1\% \pm 0,05$ (в диапазоне 0 -30 м/с),
 $\pm 3\%$ (в диапазоне 30-40 м/с);
- направление ветра: $\pm 3^0$ (в диапазоне 1-30 м/с),
 $\pm 5^0$ (в диапазоне 30-40 м/с).

Уровни (высоты) расположения датчиков:

- приземных измерений: 8 м;
- на мачте ВММ-310: 25 м, 73 м, 121 м, 217 м, 301 м.

На рисунке 4.10 представлен профилометр ПЛВ-300 вместе с мачтой ВММ-310 во время испытаний на полигоне ФГБУ «НПО «Тайфун».

В процессе испытаний обеспечивалась синхронизация отсчета данных с начала измерений на комплексе ВММ-310 и профилометре ПЛВ-300. Измерения проводились в различных метеоусловиях с длительностью не менее одного часа на каждой высоте. При этом осуществлялась регистрация прямых измерений и вывод результатов скользящего осреднения величины скорости и направления ветра за 2 минуты.



Рисунок 4.10 - Фотография профилометра ПЛВ-300 и мачты ВММ-310 на полигоне ФГБУ «НПО «Тайфун»

Далее представлены результаты, полученные в ходе сертификационных испытаний, которые проводились с 19³⁰ 09 августа до 10⁰⁰ 10 августа 2011 г на испытательном полигоне ФГБУ «НПО «Тайфун».

Высота проведения измерений - 121 м. Метеоусловия: метеорологическая дальность видимости МДВ - 5 км; облачно; температура - (21 – 16) °С; дождь с интенсивностью (0,2 – 2,4) мм/час; влажность (75 – 93) %.

Сравнение результатов синхронных измерений скорости и направления ветра с помощью ВММ-319 и ПЛВ-300 приведено в таблице 4.2. и на рисунках 4.11 - 4.13. Представлены результаты выборки 9967 значений с дискретностью в 4 секунды для высоты 121 м. Графики на рисунке 4.11. иллюстрируют зависимость данных, регистрируемых ПЛВ-300 (кривые, выделенные на графиках синим цветом), и данных, регистрируемых ВММ-310 (кривые, выделенные на графиках зеленым цветом), от времени. Одно измерение соответствует осредненным за две минуты данным. Период следования данных соответствует периоду работы ПЛВ и составляет четыре секунды. Рисунок 4.12 содержит результаты сравнений измеренных величин скорости ветра, а рисунок 4.13 – результаты сравнений измеренных величин направления ветра.

Таблица 4.2 - Сравнение результатов измерений ПЛВ-300 и ВММ-310

Высота, [м]		121
Объем выборки данных		9967
Диапазон измеренных скоростей, [м/с]		1 – 12
Количество экспериментов, вышедших за допустимый интервал погрешностей	по скорости – ± 0.5 м/с (скорость ≤ 5 м/с) $\pm 10\%$ (скорость > 5 м/с)	330 (3,26%)
	по направлению - $\pm 10^\circ$	264 (2.6%)
Оценка математического ожидания разностей результатов измерений профилометра ПЛВ-300 и датчиков ВММ-319 (по скорости и направлению ветра)	$m(V_{Д_{ПЛВ}} - V_{Д_{ВММ}})$ [м/с]	0,23
	$m(\alpha_{Д_{ПЛВ}} - \alpha_{Д_{ВММ}})$ [град]	0,98
Оценка СКО ПЛВ по скорости и направлению ветра	E_V [м/с]	0,288
	E_α [град]	4.38

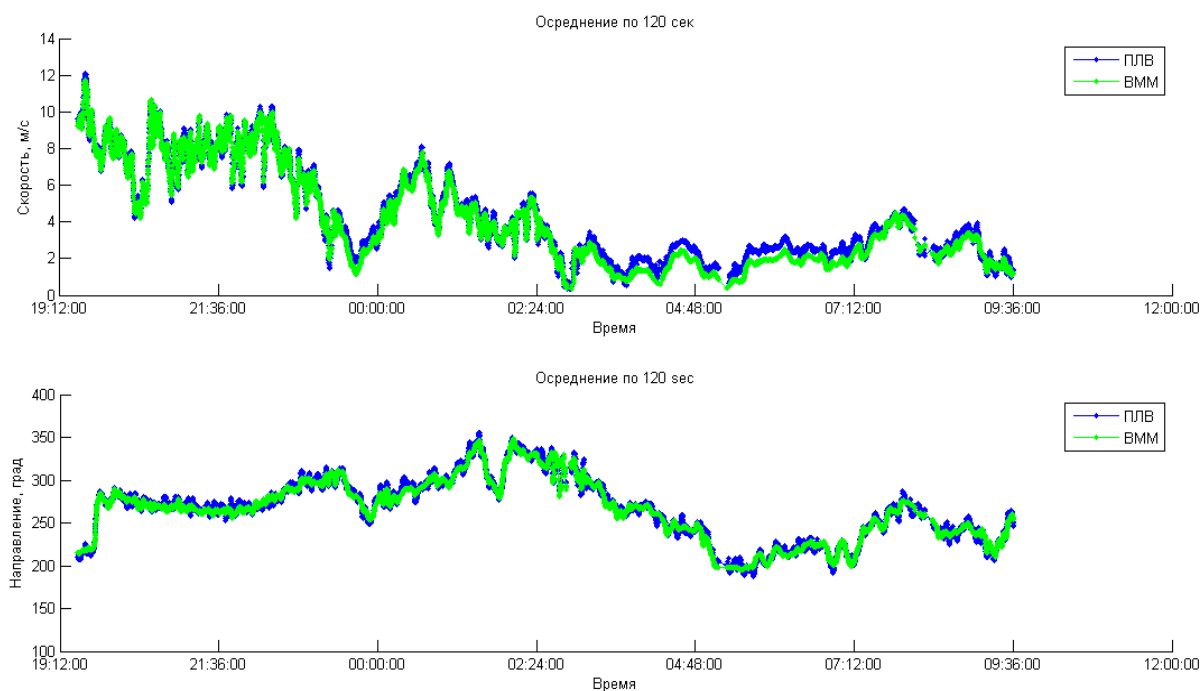


Рисунок 4.11 - Зависимость данных, регистрируемых ПЛВ-300 и ВММ-310, от времени для высоты 121 м. Осреднение данных: 2 минуты.
Начало записи 19³⁰ 09.08.2011 г. Окончание записи 10⁰⁰ 10.08.2011 г.

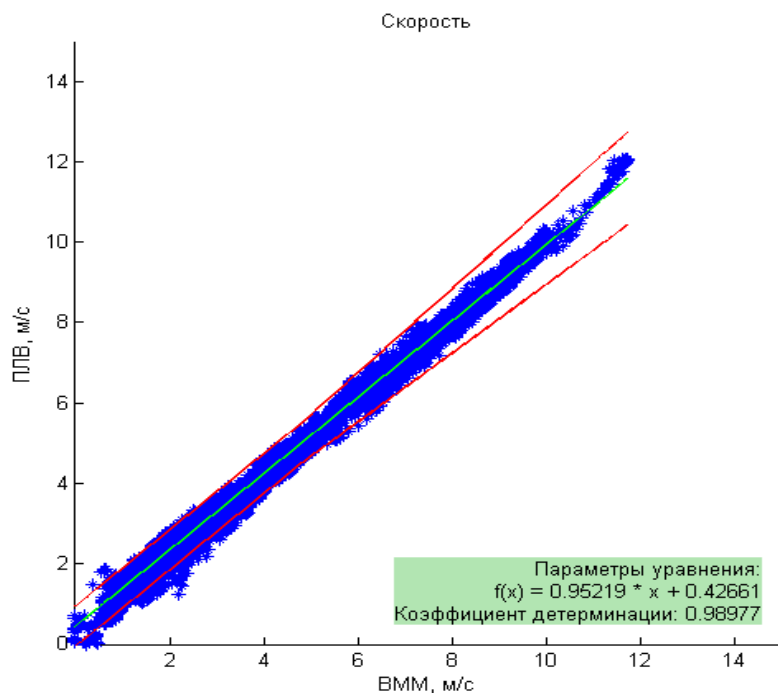


Рисунок 4.12 - Зависимость данных о скорости ветра, полученных при помощи ПЛВ-300 от данных, полученных при помощи ВММ-310

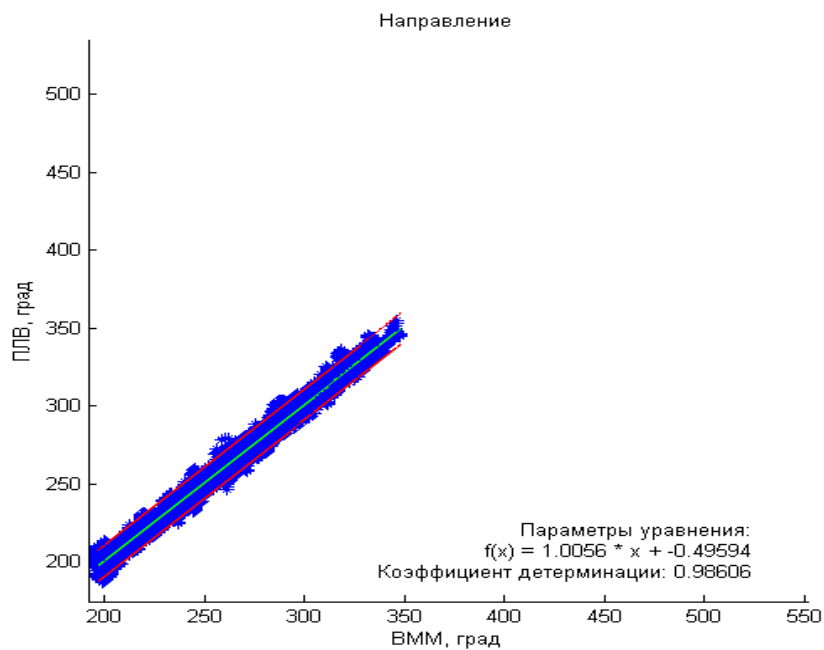


Рисунок 4.13 - Зависимость данных о направлении ветра, полученных при помощи ПЛВ-300 от данных, полученных при помощи ВММ-310

Погрешности измерений скорости и направления ветра, представленные в таблице 4.2 и на рисунках 4.11-4.13, находятся в интервале, заданном сертификационными требованиями. Количество экспериментов, вышедших за допустимый интервал, составляло соответственно 3,26 % для скорости и 2,6 % для направления.

Всего за время испытаний на полигоне ФГБУ «НПО «Тайфун» проведено 30 непрерывных циклов измерений на разных высотах с длительностью от 1 часа до 24 часов. Эксперименты проводились в разные времена года в широком диапазоне метеоусловий: метеорологическая дальность видимости МДВ – (5-20) км; температура: (-25 – 30) °С; интенсивность дождя до 5,1 мм/час; снег – до 0,35 мм/час; влажность (55 – 93) %.

Максимальные абсолютные погрешности измеренной профилометром скорости и направления ветра при всех проверках составляли:

- от + 0,35 до - 0,07 м/с при скорости ветра до 5 м/с;
- ± 1 % при скорости ветра более 5 м/с;
- от + 8° до - 4° по направлению ветра.

Данные погрешности находились в пределах заданных сертификационными требованиями (Базисом) погрешностей измерений (± 10 % по скорости и $\pm 10^\circ$ по направлению). Максимальное количество экспериментов, вышедших за допустимый интервал погрешностей, составляло 7,5% для скорости и 5% для направления.

По результатам проведенных проверок на соответствие сертификационным требованиям были сделаны следующие выводы.

Профилометр обеспечивает измерение параметров ветра на фиксированных высотах в диапазоне от 3 до 300 м с задаваемой кратностью (10-100 м). При измерениях мгновенной скорости и направления ветра обеспечивается скользящее осреднение скорости и направления ветра с периодом в 3 с.

Пределы допустимой погрешности измерения скорости и направления ветра находились в заданных пределах, а именно:

- $\pm 0,5$ м/с при скорости ветра до 5 м/с;

$\pm 10\%$ при скорости ветра более 5 м/с;

$\pm 10^\circ$ по направлению ветра.

Оборудование совместимо с линиями связи, использующими интерфейсы RS-232 или RS-485, либо с модемной линией связи. Обеспечивается передача сигналов от первичного преобразователя на входное устройство средства отображения информации или ПЭВМ на расстояние не менее 8 км.

На мониторе оператора отображается следующая информация:

- скользящее осреднение скорости и направления ветра за истекшие 2 мин с погрешностями измерения мгновенной скорости и направления ветра;

- определение встречно/попутной составляющей скорости ветра относительно ВПП;

- вертикальный сдвиг ветра по продольной составляющей скорости ветра относительно направления ВПП на 30 м высоты;

На дисплее монитора оператора обеспечивается индикация градаций по интенсивности вертикального сдвига ветра в соответствии с таблицей 4.3.

Каждая градация имеет свою цветовую индикацию.

Частота обновления выдаваемой на средства отображения информации о параметрах и сдвиге ветра составляет не более 1 минуты.

Таблица 4.3 - Индикация вертикального сдвига ветра

Классифицирующий термин интенсивности сдвига ветра	Вертикальный сдвиг ветра в м/с на 30 м высоты
Слабый	0 – 2,0
Умеренный	2,1 – 4,0
Сильный	4,1 – 6,0
Очень сильный	более 6,0

Профилометр обеспечивает регистрацию и хранение всей выдаваемой на средства отображения информации о параметрах ветра, вертикальном сдвиге ветра, а также о техническом состоянии оборудования и действиях оператора в течение не менее 30 суток.

На дисплее монитора оператора обеспечивается звуковая и световая сигнализация при поступлении информации о сдвиге ветра на 7,5 м/с или более.

На основании проведенных испытаний Комиссией МАК по сертификации аэродромов и оборудования на профилометр ПЛВ-300 выдан сертификат типа оборудования № 544.

4.4 Рекомендации по совершенствованию применения ветрового лидарного профилометра в системе метеобеспечения и результаты его использования для мониторинга вихревых следов

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что разработанный в НПП «Лазерные системы» профилометр лидарный ветровой с монитором оператора ПЛВ-300 успешно прошел необходимые испытания и может использоваться в системе авиационной безопасности для оперативного дистанционного измерения скорости и направления ветра на заданных высотах с последующим отображением и передачей полученных данных с помощью средств связи на компьютер оператора для дальнейшего анализа. При этом ПЛВ-300 позволяет дистанционно определить:

- вертикальную компоненту скорости ветра;
- горизонтальную компоненту скорости ветра;
- измерять направление вектора скорости относительно направления на север;
- встречно/попутную составляющую скорости ветра относительно ВПП;
- вертикальный сдвиг ветра по продольной составляющей скорости ветра относительно направления ВПП.

Учитывая инновационный характер представленного лидарного профилометра, следует отметить необходимость последующей доработки и окончательного согласования формата представления данных для диспетчерских служб аэропортов и интеграции разрабатываемой системы в структуру наземных

метеорологических служб, передающих информацию авиадиспетчерам, в ходе проведения запланированной опытной эксплуатации на аэродромах в России.

Основываясь на опыте разработки лидарных систем в НПП «Лазерные системы», а также результатах, изложенных в обзоре [96], следует отметить необходимость дополнения профилометра лидарного ветрового с монитором оператора ПЛВ-300 с непрерывным излучением ветровым когерентным доплеровским лидаром импульсного типа. Данная рекомендация была вызвана тем, что диапазон рабочей дальности для ПЛВ-300 ограничен 300 метров. В случае увеличения рабочей дальности необходимость фокусировки лазерного луча на заданное расстояние приводит к увеличению объема зондирования. Так при фокусировке зондирующего лазерного луча на расстояние 1,5 – 2 км продольный размер объема зондирования становится сравним с дальностью измерения, что влечет за собой соответствующие сложности. В то же время для эффективного решения задач авиационной безопасности в зоне ВПП требуется оперативная осведомленность о ветровой обстановке на дальностях до 1000 и более метров. Внешний вид (рисунок 4.14), описание и характеристики подобного импульсного ВКДЛ ПЛВ-2000, который в настоящее время разработан в НПП «Лазерные системы» и находится на этапе эксплуатации, приведены ниже.



Рисунок 4.14 - Внешний вид ПЛВ-2000.

Импульсный ветровой лидар нового поколения ПЛВ-2000 представляет собой мощный инструмент сбора и создания базы данных для систем авиационной безопасности аэропортов, метеорологических служб и мониторинга экологической обстановки. В частности ПЛВ-2000 предоставляет следующую информацию:

- о сдвиге ветра и других опасных ветровых явлениях;
- о вихревых следах летательных аппаратов;
- о турбулентности;
- о вертикальном профиле ветра до высоты более 2000 метров;
- 3D-картографирование ветрового поля в зоне своей ответственности.

ПЛВ-2000 способен работать в следующих режимах:

- круговое сканирование в заданном диапазоне углов азимута с произвольным значением угла места от 0 до 85 градусов;
- сканирование в вертикальной плоскости в заданном диапазоне углов места с произвольным значением азимута;
- режим измерения профиля ветра в произвольном заданном направлении (диапазон углов места от 20 до 90 градусов);
- режим «лазерного ножа» для обнаружения вихревых следов за летательными аппаратами.

ПЛВ-2000 нечувствителен к облачности, исключая очень плотные облака ниже 250 м. Данные дистанционного зондирования могут быть переданы в авторизованные метеорологические центры для использования в моделях прогноза погоды.

Технические характеристики ВКДЛ ПЛВ-2000:

Максимальная высота измерений: 2000 м;

Минимальная высота измерений: до 60 м;

Максимальная скорость ветра: 60 м/с;

Минимальная скорость ветра: 0 м/с;

Диапазон измерения направления ветра: от 0 до 360 градусов;

Длина волны лазерного излучения: 1550 - 1570 нм;

Режим работы – импульсный;
 Энергия импульса: ≥ 100 мкДж;
 Длительность лазерного импульса: 400 нс;
 Частота повторения импульсов: 10 кГц;
 Пространственное разрешение: ~ 30 м;
 Диаметр приемопередающего телескопа: 100 мм;
 Время измерения полного вектора скорости: 15 с.

Отметим, что результаты и выводы, полученные автором в данной работе, использованы в информационном обеспечении эксплуатируемых в настоящее время ветровых когерентных лазерных профилометров ПЛВ-300 непрерывного и ПЛВ-2000 импульсного типов. Так данные серийно выпускаемые отечественные профилометры впервые в России обеспечили возможность провести измерения вихревых следов различных типов самолетов [101]. Основываясь на математической модели вихревого следа [97-99], в НПП «Лазерные системы» с участием автора была разработана схема образования спутных вихревых следов за самолетом и распределение радиальной скорости течения воздуха за ним, представленные на рис. 4.15.

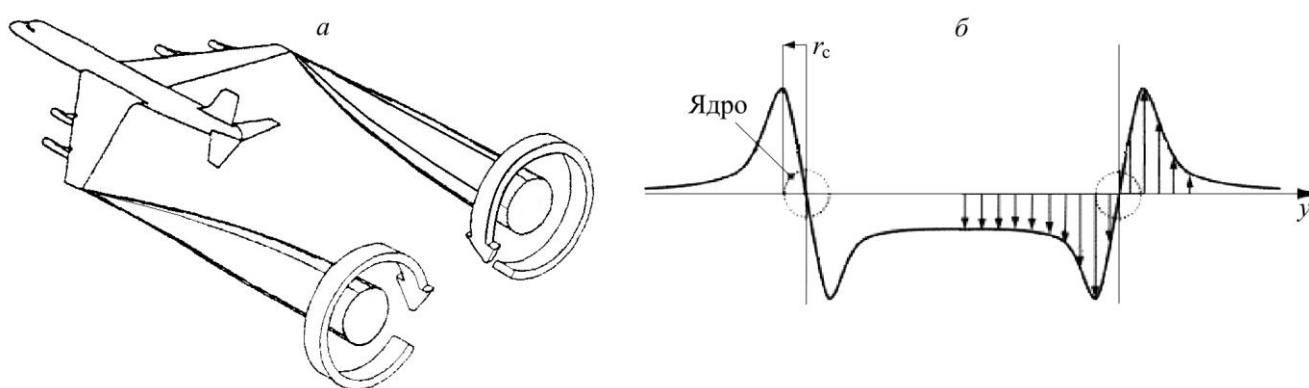


Рисунок 4.15 Вихревой след за самолетом: а — образование пары вихрей;
 б — распределение радиальной скорости.

Известно, что при полете самолета за ним образуется пара вихревых следов, исходящих с законцовок крыла самолета, из-за разности между скоростями

обтекания поверхностей крыла и особенностей его формы. Распределение тангенциальной скорости течения воздуха за самолетом, размер вихрей и их взаимное расположение определяются типом самолета, внешними условиями его полета и атмосферной турбулентностью. Попадание других летательных аппаратов в вихрь за самолетом может представлять для них серьезную опасность, особенно если следующий самолет имеет меньшие размеры и находится на ответственном участке глиссады при взлете или посадке [98].

Динамика спутного следа за самолетом определяется фоновой скоростью ветра, степенью турбулентности атмосферы и другими факторами. Отличительной особенностью вихрей, образующихся за самолетом, является их взаимодействие с поверхностью земли, в некоторых случаях происходит отскок вихря от земли без его разрушения или ослабления силы. В нормальных условиях при отсутствии фонового ветра вихри опускаются и расходятся, как показано на рис. 4.16.

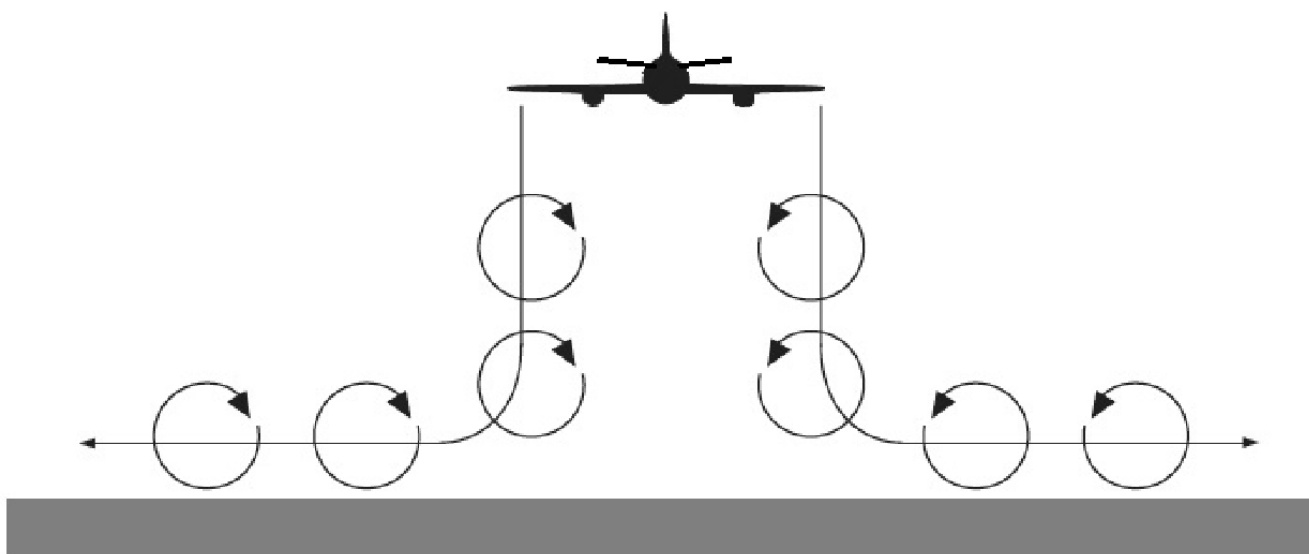


Рисунок 4.16 Динамика вихрей в спокойной атмосфере.

Сканирование вихревого следа лучом доплеровского лидара позволяет получить пространственное распределение его радиальной скорости, по которой на основе математического моделирования можно определить параметры вихря: координаты центра его ядра и величину циркуляции. Очевидно, эти данные могут быть использованы в системе авиационной безопасности.

Поперечный размер ядра вихревого следа самолета составляет несколько метров через несколько секунд после его образования, а расстояние между двумя вихрями за самолетом определяется размахом его крыла, поэтому для надежного детектирования вихревого следа самолета необходимо использовать лидар с пространственным разрешением в несколько метров. В доплеровских импульсных лидарах пространственное разрешение определяется длительностью импульса и связано со скоростным разрешением обратно пропорциональной зависимостью, поэтому, уменьшая пространственное разрешение, мы увеличиваем скоростное разрешение. Серия проведенных экспериментальных исследований [101-102] показала, что путем цифровой обработки сигнала обратного рассеивания от вихря за самолетом и последующей математической обработки данных о распределении его радиальной скорости, полученных с помощью лидара ПЛВ-2000 с длительностью импульса 200 нс, можно обеспечить уверенное детектирование вихревых следов самолетов различных весовых категорий. Технические характеристики использованного для проведения измерений лидара представлены в таблице 4.4. Внешний вид использованного лидара и его оптический блок показаны на рис. 4.17.

Таблица 4.4 - Технические характеристики использованного лидара

Параметр	Значение
Дистанция детектирования вихрей, м	30–1500*
Пространственное разрешение, м	30**
Диапазон сканирования:	
по азимуту, град	0–360
по углу места, град	–10–+ 190
Максимальная скорость сканирования, град/с	5
Скорость переброса (без измерений), град/с	45
Погрешность измерения радиальной скорости ветра, м/с	± 0.5
Длина волны лазерного излучения, нм	1560 ± 10

Примечание * — определяется состоянием атмосферы, ** — измерение по лучу

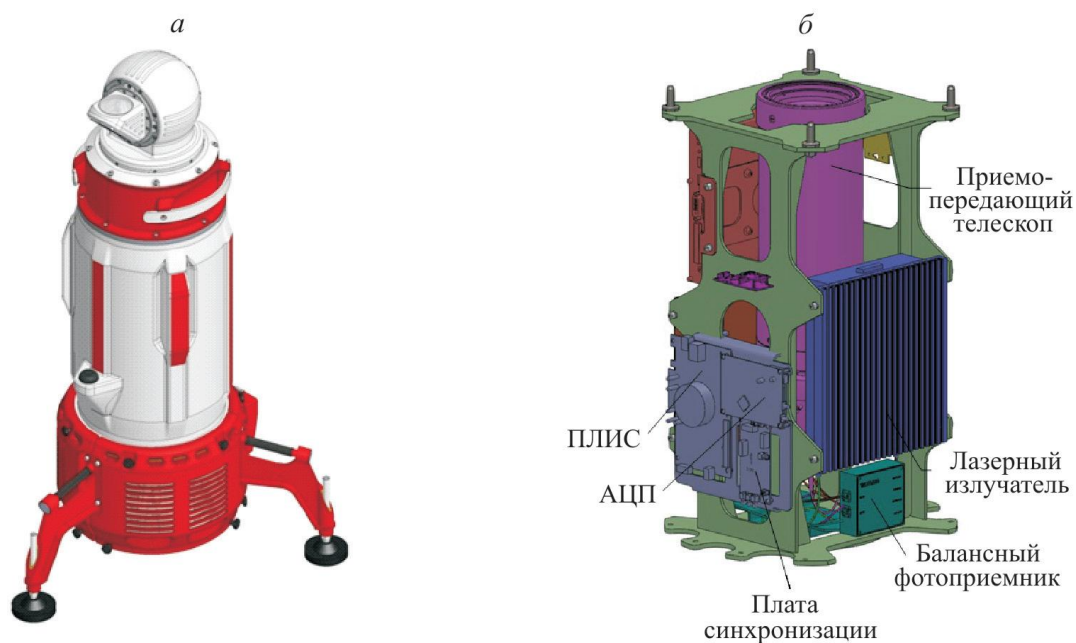


Рисунок 4.17 Когерентный доплеровский лидар: *а* — внешний вид; *б* — оптический блок.

Экспериментальные исследования проводились в районе аэропорта Пулково (г. Санкт-Петербург). Было выбрано положение, при котором линейное и боковое расстояния лидара относительно среза взлетно-посадочной полосы (ВПП) составляли порядка 800 м и 1200 м соответственно (рис. 4.18, *а*).



Рисунок 4.18 Схема расположения когерентного доплеровского лидара (*б*) относительно ВПП (*а*) и его внешний вид.

Испытания проводились в следующих метеусловиях: метеорологическая дальность видимости (МДВ) 9 км, разорванная на 60–90% общая (низкая горизонтальная) облачность 840 м, температура воздуха 0–+1 оС, слабый снег или дождь, влажность 75–93%. На рис. 4.18, б представлен действующий лазерный сканер вихревых следов в процессе экспериментальных исследований, размещенный в указанной на рис. 4.18, а точке. Размер сектора сканирования воздушного пространства выбирался с учетом возможного перемещения вихревых следов.

Результаты детектирования вихревых следов за самолетом с помощью сканера вихревых следов в режиме RHI (range height indicator) в реальном времени представлены на рис. 4.19. Рис. 4.19, а иллюстрирует ветровое поле с характерным для вихрей (выделено черным прямоугольником) распределением положительной и отрицательной скоростей на начальной стадии их формирования. На рис. 4.19, б представлена ситуация через 2 мин 43 с. Графически показана динамика развития детектируемого вихревого следа за самолетом Боинг 737-800 при сканировании в режиме RHI (ось абсцисс — дальность в метрах, ось ординат — высота в метрах). Сканирование производилось с угловой скоростью 1 град/с, время накопления составляло 0.5 с. Угловой размер сектора сканирования равнялся 16 град. При выбранной скорости сканирования данные о вихревой обстановке обновлялись за 16 с. Результаты измерений показали, что время жизни вихревого следа составляет порядка 4.5 мин.

Анализ полученных результатов показал, что начальная скорость опускания вихревого следа составляет 2.5 м/с. После опускания вихревого следа на высоту порядка 40–50 м наблюдаются эффекты расхождения вихревой пары с одновременным увеличением высоты вихрей. Эффект увеличения высоты вихрей (так называемый подскок вихря) обусловлен явлением отрыва приземного пограничного слоя и более выражен для левого вихря. Подскок правого вихревого жгута менее значителен, и основным фактором его эволюции является боковое перемещение, обусловленное как собственной динамикой вихря вблизи

подстилающей поверхности, так и влиянием бокового ветра, скорость которого составляет 2–2.5 м/с.

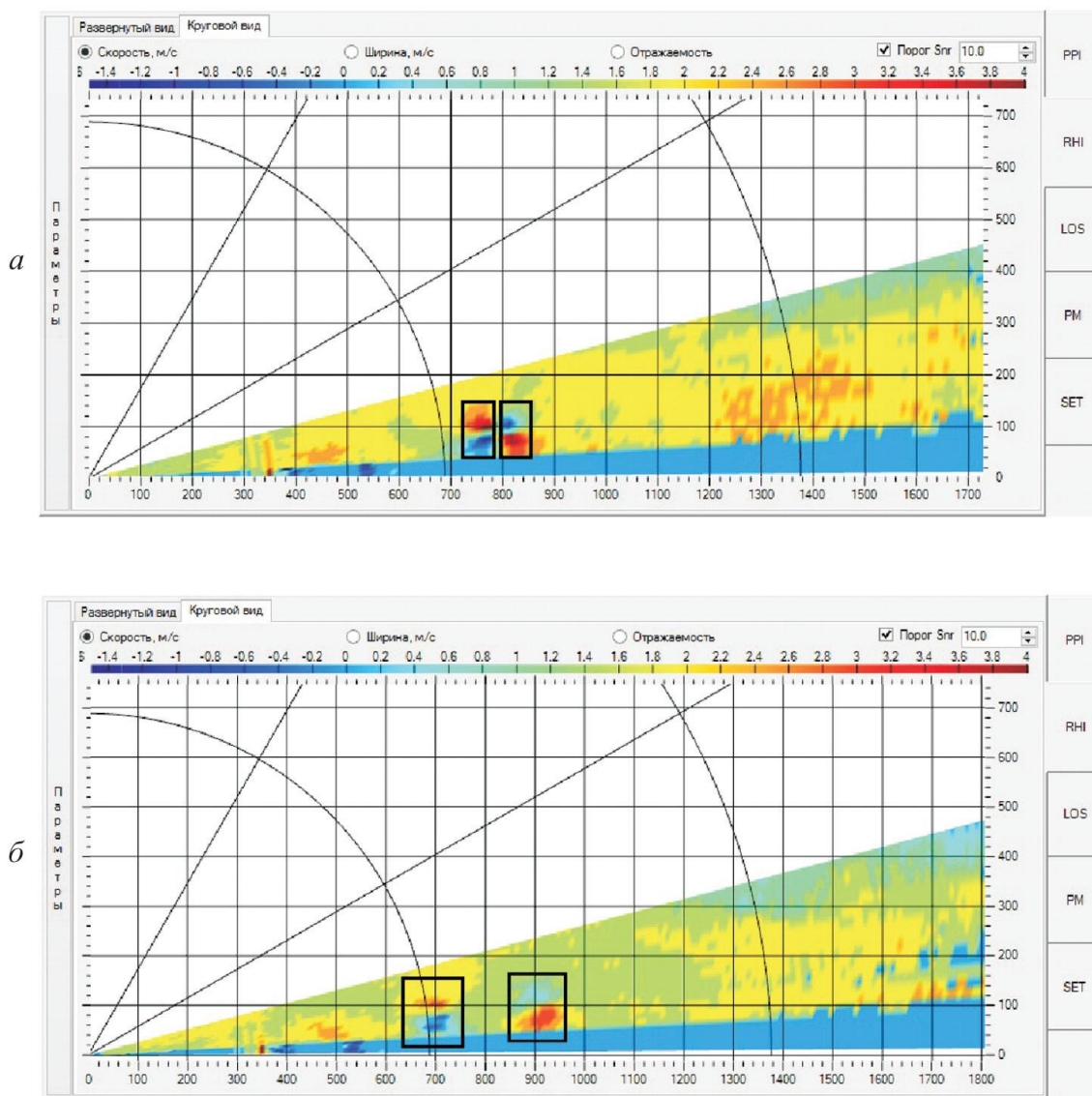


Рисунок 4.19. Вихревой след за самолетом Боинг 737-800 на начальной стадии его развития (а) и через 2 мин 43 с (б).

Поскольку скорость бокового ветра и начальная скорость перемещения вихревого следа самолета близки по своим значениям, наблюдается эффект зависания левого вихревого жгута вблизи посадочной глиссады, а влияние отрыва приземного пограничного слоя приводит к тому, что это зависание происходит на высотах, близких к начальной высоте пролета самолета через плоскость сканирования. С точки зрения обеспечения безопасности посадки самолета такая динамика вихревого следа является наиболее опасной. Принимая во внимание

значительное время существования вихревого следа самолета, можно предположить, что безопасная дистанция для самолета той же весовой категории, что и Боинг 737-800, должна составлять с учетом посадочной скорости самолета не менее 7 км (примерно 4 морские мили). Это расстояние существенно превышает минимумы эшелонирования по интенсивности вихревого следа (2.5 морские мили), рекомендованные ICAO для самолетов этого типа.

Определение координат центров ядра вихревых жгутов в плоскости сканирования в режиме RHI осуществлялось на основе оценок положений точек экстремума радиальной скорости вдоль луча сканирования в соответствии с методикой, изложенной в работе [101]. На рис. 4.20 показана итоговая алгоритмически восстановленная траектория (черная линия) эволюции вихревых жгутов в плоскости сканирования за все время измерений.

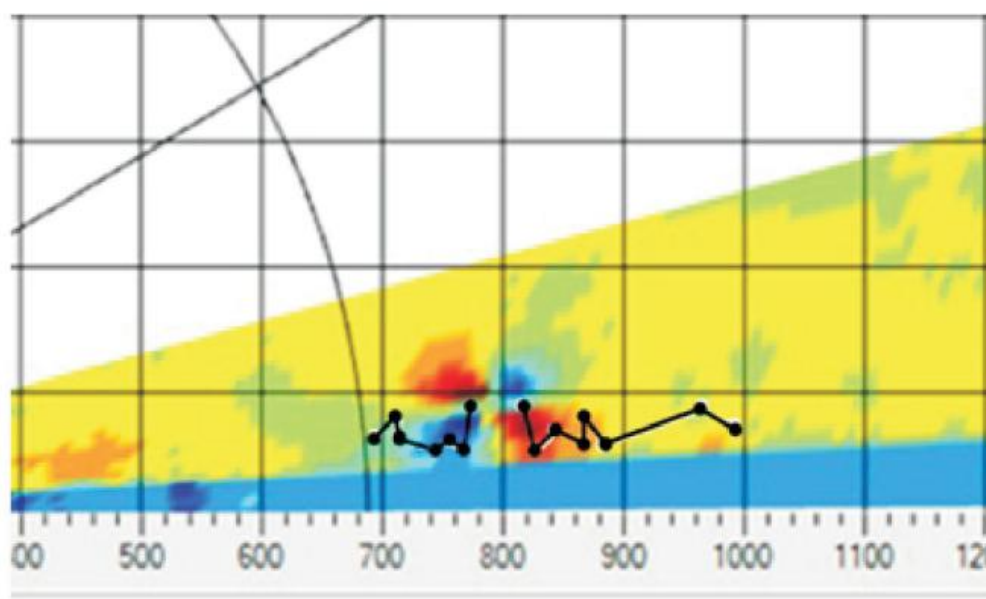


Рисунок 4.20 Восстановленная траектория эволюции вихревого следа за самолетом Боинг 737-800.

Сканирующая система доплеровского лидара позволяет сканировать всю верхнюю полусферу в произвольных режимах и последовательностях. Детектирование вихревых следов также возможно в режиме LOS (измерения в фиксированном направлении) и в режиме PPI (измерения при фиксированном угле места и варьируемом азимутальном угле). На рис. 4.21 представлены

результаты измерения в режиме LOS в течение некоторого времени, показывающие вихревые следы различных самолетов.

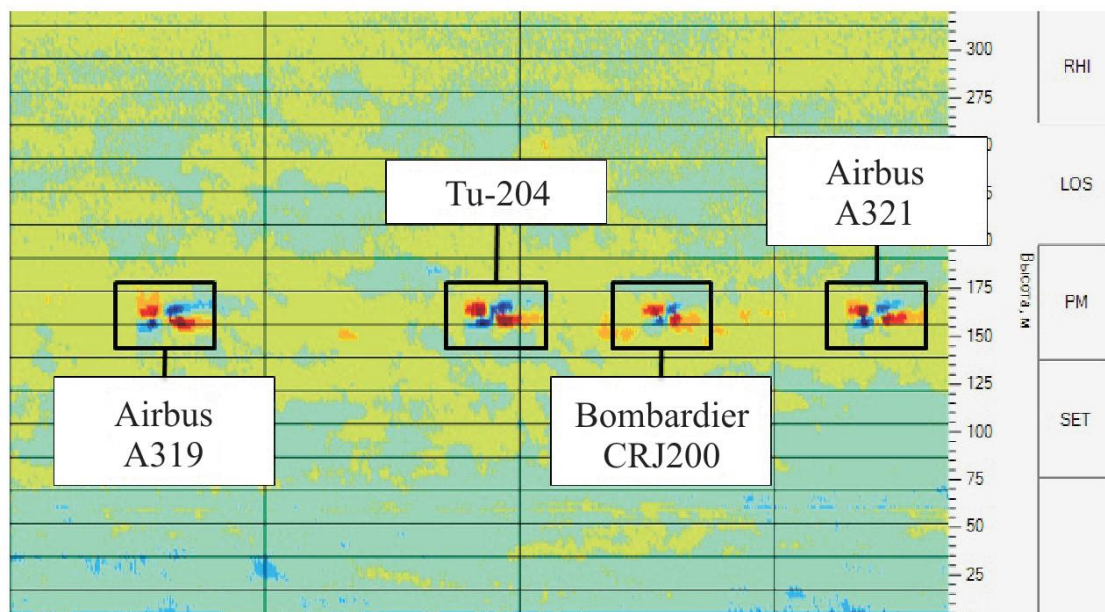


Рисунок 4.21 Вихревые следы от различных самолетов.

Таким образом, разработанное в целом информационное обеспечение и в частности его программно-алгоритмическая часть, созданные с целью управления и обработки данных лидарного профилометра позволяют наносить на карту местности результаты измерений.

Выводы по главе 4

1. В качестве экспериментального ВКДЛ, информация с которого использовалась для отработки предложенных методов и алгоритмов, реализованных в составе программно-алгоритмического обеспечения, выбран непрерывный ветровой когерентный доплеровский лидарный профилометр с коническим сканированием, работающий на длине волны 1,55 мкм, разработанный в ООО НПП «Лазерные Системы».

2. Результаты обработки сигнала, полученного с помощью ПЛВ-300, показали, что совокупность аппаратного и предложенного программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского

лидарного профилометра позволяет обеспечить соответствие сертификационным требованиям Международного авиационного комитета, что подтверждено сертификатом типа оборудования № 544. В частности, пределы допустимой погрешности измерения скорости и направления ветра находились в заданных пределах, а именно: $\pm 0,5$ м/с при скорости ветра до 5 м/с; $\pm 10\%$ при скорости ветра более 5 м/с; $\pm 10^\circ$ по направлению ветра.

3. Учитывая, что в предложенном варианте программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием заложены основные принципы его организации, следует отметить необходимость последующей его доработки и, например, окончательного согласования формата представления данных для диспетчерских служб аэропортов. Необходима также интеграция разрабатываемой системы на базе ПЛВ в структуру наземных метеорологических служб, передающих информацию авиадиспетчерам, в ходе проведения опытной и последующей эксплуатации на аэродромах в России.

4. На основе анализа особенностей функционирования ВКДЛ с коническим сканированием непрерывного и импульсного типа, а также их тактико-технических характеристик, для эффективного решения задач авиационной безопасности в зоне ВПП с целью оперативного мониторинга ветровой обстановки в приземном слое атмосферы на высотах от 3 до 1000 и более метров, предложено совместное использование как непрерывного ПЛВ, так и импульсного ПЛВ, характеристики которых друг друга взаимно дополняют.

5. В результате проведения экспериментальных исследований впервые в России осуществлены измерения вихревых следов ряда самолетов в аэропорту Пулково с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000. Полученные материалы позволяют усовершенствовать математические модели образования вихревых следов летательных аппаратов в приземном слое атмосферы, а также исследовать динамику их развития и тем самым сформулировать рекомендации по обеспечению требуемого уровня авиационной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации поставлена и решена актуальная научная и практическая задача, которая заключается в обосновании и разработке методов и алгоритмов обработки данных когерентного доплеровского лидарного профилометра, входящего в систему метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

В ходе работы над диссертацией получены следующие основные результаты.

1. Показано, что растущий поток пассажирских и грузовых перевозок на региональных и трансконтинентальных направлениях, как в России, так и за рубежом приводит к существенному увеличению парка воздушных судов самого различного типа и назначения. В результате на современном этапе развития воздушного транспорта актуальным является вопрос повышения уровня авиационной безопасности. Решение проблемы безопасности полета воздушных судов во многом определяется корректностью учета целой совокупности различных факторов и в том числе метеоусловий, как на трассе полета, так и в зонах аэропортов взлета и посадки. В связи с повсеместным повышением интенсивности воздушных перевозок, наряду с такими опасными ветровыми метеорологическими явлениями, как турбулентность, струйные течения, спутные следы самолетов, безусловно, следует рассматривать, исследовать и определять сдвиг ветра в приземном слое атмосферы, особенно в ВПП. Точная и своевременная информация о ветровом поле в приземном слое атмосферы, которое характеризуется высокой динамикой происходящих процессов, позволяет повысить безопасность полетов летательных аппаратов и снизить процент аварий и катастроф.

2. В результате сравнительного анализа контактных и дистанционных методов и средств мониторинга ветровой обстановки в приземном слое атмосферы в диапазоне высот от единиц метров до нескольких сотен метров

сделан вывод о перспективности использования в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности когерентных доплеровских лидарных профилометров с непрерывным и импульсным излучением.

3. С учетом особенностей атмосферной зоны в районе ВПП для мониторинга ветровой обстановки на высоте от 3 метров до 300 метров с целью определения такого опасного метеоявления, как сдвиг ветра, рекомендуется использовать когерентный доплеровский ПЛВ с непрерывным излучением и коническим сканированием пространства, работающий на длине волны в единицы микрометров. Такой профилометр при коническом сканировании пространства в предположении о замороженности зондируемой части атмосферы позволяет однозначно определять, как абсолютную величину скорости ветра, так и его направление.

4. В условиях бурного развития компьютерных и инфокоммуникационных технологий определено, что когерентный доплеровский ПЛВ и его система обработки информации должны рассматриваться как информационные системы в соответствии с принципами системного и ситуационного подходов. При этом ПЛВ, как и любой другой измерительный прибор, следует рассматривать в виде совокупности средств, включающих аппаратное и информационное обеспечение. В свою очередь информационное обеспечение профилометра включает в себя математическое, программное и организационно-методическое обеспечение. Установлено, что выбор оптимального соотношения аппаратного и информационного обеспечения является важнейшей задачей, так как внесение изменений в состав и структуру аппаратного обеспечения в период эксплуатации является сложной и трудоемкой операцией. В то же время достаточно легкая процедура модернизации информационного обеспечения делает перспективным разработку новых методов и алгоритмов обработки данных различных датчиков, в том числе ПЛВ, с целью улучшения их тактико-технических характеристик и изменения их целевого назначения в

зависимости от требований СППР КДП аэропорта при решении задачи повышения уровня авиационной безопасности воздушных судов на этапе взлета и посадки.

5. Показано, что математическая и программно-алгоритмическая части информационного обеспечения ПЛВ включают в себя математические модели используемой аппаратуры, объектов наблюдения, трассы распространения сигналов и полей, критерии качества, методы и алгоритмы обработки данных, базы данных и знаний, программное обеспечение.

6. В результате проведенных исследований построена математическая модель сигнала ПЛВ с непрерывным излучением и коническим сканированием в предположении, что за время сканирования ветровые характеристики атмосферы существенно не изменяются. Разработана общая схема измерительного процесса, а также алгоритма обработки лидарного сигнала. В соответствии с построенной математической моделью усредненный спектр лидарного сигнала содержит совокупность доплеровского спектра полезного сигнала и неравномерного спектра фона. Принято, что в рассматриваемых условиях гауссовской природы отраженного от аэрозоля лазерного сигнала вид доплеровского спектра полезного сигнала можно считать колоколообразным.

7. В соответствии с общей схемы обработки гетеродинного сигнала когерентного доплеровского ПЛВ разработаны методы и алгоритмы выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном. В основе этих методов лежит последовательное применение алгоритмов скользящей медианной фильтрации и скользящего усреднения с изменяемым размером скользящего окна. При использовании алгоритма медианной фильтрации обоснованным является то, что для эффективного подавления импульсной помехи скользящее окно должно иметь размер, более чем вдвое превышающий длительность этой импульсной помехи, то есть колоколообразной функции, которая описывает полезный доплеровский сигнал.

8. С целью уменьшения времени обработки сигнала ПЛВ на основе концептуального подхода, связанного с разделением разрядной сетки при цифровом представлении анализируемого спектрального сигнала, предложен метод одновременного сглаживания данных, представленных старшими разрядами, алгоритмом скользящей медианной фильтрации, а данных, представленных младшими разрядами, алгоритмом скользящего локального усреднения. Соотношение количества старших и младших разрядов при делении разрядной сетки определяется уровнем отношения сигнал/шум и свойствами анализируемого сигнала.

9. В соответствии с общей схемой алгоритма обработки сигнала ПЛВ наряду с этапами, связанными с операциями нормировки и пороговой обработки доплеровского спектра с целью устранения случайных выбросов, установлено, что при определении параметров колоколообразной функции должны быть использованы такие методы, как центроидный, гауссовской и сплайн аппроксимации, а также порядковых статистик. Наиболее простым и широко используемым является центроидный метод, который, однако, позволяет проводить оценку только положения максимума колоколообразной функции. С точки зрения простоты реализации и достаточно высоких точностных характеристик при определении оценок не только положения максимума, связанного с величиной радиальной составляющей скорости ветра, колоколообразной функции, но также и ее ширины, связанной со степенью ветровой турбулентности, наиболее перспективным представляется метод порядковых статистик.

10. Завершающим этапом в общей схеме обработки гетеродинного сигнала ПЛВ является определение полного вектора скорости ветра по данным нескольких оборотов сканирования атмосферы на выбранной высоте методом наименьших квадратов по известной из литературных источников методике. В то же время определение направления скорости ветра предложено осуществлять аппаратным методом за счет изменения частоты опорного сигнала на известную величину. В этом случае к имеющейся

информации о фазе сигнала добавляется 0 или 180 градусов в зависимости от взаимного положения, ранее полученной оценки центральной частоты полезного доплеровского спектра, и пика, обнаруженного на выбранном обороте сканирования со сдвинутой частотой лазерного сигнала.

11. В качестве экспериментального ПЛВ, информация с которого использовалась для отработки предложенных методов и алгоритмов, реализованных в составе программно-алгоритмического обеспечения, выбран непрерывный ветровой когерентный доплеровский лидарный профилометр с коническим сканированием, работающий на длине волны 1,55 мкм, разработанный при непосредственном участии автора в ООО НПП «Лазерные Системы».

12. В результате обработки экспериментальных данных, полученных с помощью когерентного доплеровского лидарного профилометра ПЛВ-300 с непрерывным излучением и коническим сканированием, в ходе сертификационных испытаний сертификационных испытаний на базе измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун». установлено, что совокупность аппаратного и предложенного программно-алгоритмического обеспечения позволяет обеспечить соответствие сертификационным требованиям Международного авиационного комитета, что подтверждено сертификатом типа оборудования № 544. В частности, пределы допустимой погрешности измерения скорости и направления ветра находились в заданных пределах, а именно: $\pm 0,5$ м/с при скорости ветра до 5 м/с; $\pm 10\%$ при скорости ветра более 5 м/с; $\pm 10^\circ$ по направлению ветра.

13. Учитывая, что в предложенном варианте программно-алгоритмического обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием заложены основные принципы его организации, следует отметить необходимость последующей его доработки и, например, окончательного согласования формата представления данных для диспетчерских служб

аэропортов. Необходима также интеграция разрабатываемой системы на базе ПЛВ в структуру наземных метеорологических служб, передающих информацию авиадиспетчерам, в ходе проведения опытной и последующей эксплуатации на аэродромах в России.

14. В работе отмечена такая особенность ПЛВ с непрерывным излучением и коническим сканированием, когда с увеличением дальности или высоты зондирования их величина становится сравнимой с размером измерительного объема, что отрицательно сказывается на измерительных характеристиках такого профилометра. В связи с этим, для эффективного решения задач авиационной безопасности в зоне ВПП с целью оперативного мониторинга ветровой обстановки в приземном слое атмосферы на высотах не только от 3 до 300 метров, что обеспечивается ПЛВ с непрерывным излучением и коническим сканированием, но и от 300 до 1000 и более метров, рекомендуется использовать ПЛВ с импульсным излучением и коническим сканированием, который также разработан в НПП «Лазерные системы» и эффективно эксплуатируется, в частности, в системе вихревой безопасности.

15. В результате проведения экспериментальных исследований впервые в России осуществлены измерения вихревых следов ряда самолетов в аэропорту Пулково с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000. Полученные материалы позволяют усовершенствовать математические модели образования вихревых следов летательных аппаратов в приземном слое атмосферы, а также исследовать динамику их развития и тем самым сформулировать рекомендации по обеспечению требуемого уровня авиационной безопасности.

В диссертационной работе также подчеркивается, что методы и алгоритмы, разработанные в первую очередь для анализа данных ПЛВ в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности, после соответствующей модификации пригодны и для решения других задач,

решаемых ситуационными центрами при метеорологических исследованиях, мониторинге экологической обстановки, а также в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

Дальнейшие исследования по теме диссертации целесообразно проводить в направлении совершенствования разработанных методов обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием с учетом изменения измерительного объема по мере увеличения дальности зондирования атмосферы.

Список литературы.

1. В. М. Ламзутов Состояние и перспективы развития гражданской авиации России // Вестник авиации и космонавтики. 2011. №2. С. 37.
2. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Дос. 9817-AN/449. Издание первое, 2005 г. Акт Международной Организации Гражданской Авиации. ICAO.
3. Г. А. Филатов, Г. С. Пуминова, П. В. Сильверстов. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере. – М.:Транспорт, 1992. – 272 с.
4. В. Г. Глазунов. Методические рекомендации по оценке сдвигов ветра в нижнем слое атмосферы в районе аэродрома. Пособие для синоптиков. Л.:Гидрометеиздат, 1986. – 96 с.
5. О. Г. Богаткин, В. Д. Еникеева. Анализ и прогноз погоды для авиации. СПб, Гидрометеиздат, 1992, 270 с.
6. Л. Г. Качурин Методы метеорологических измерений. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 456с.
7. В. М. Захаров, О. К. Костко, С. С. Хмелевцов. Лидары и исследование климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 320 с.
8. В. М. Захаров, О. К. Костко. Лазеры и метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1972, 62 с.
9. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике / Орлов В.Н., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 160 с.
10. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Новосибирск: Наука, 1985. – 224 с.
11. Афанасьев А.Л. Определение скорости ветра из турбулентных флуктуаций оптического излучения в атмосфере: автореф. дис. ... канд.

- физ.-мат. наук: 01.04.05 / Афанасьев Алексей Леонидович. – Томск, 2012. – 19 с.
12. Методика измерения вертикального профиля скорости и направления ветра с помощью лазерного лоатора. Вороводин В.М., Матвиенко Г.Г. Аппаратура и методики дистанционного зондирования параметров атмосферы. Новосибирск, «Наука», 1980, с. 13-19.
 13. В.М.Гордиенко, Ю.Я.Путивский Ветровой когерентный доплеровский ТЕА СО₂-лидар. Квантовая электроника, 21, №3, 1994, с. 284 – 290.
 14. И.Н.Смалихо. Об измерении скорости диссипации турбулентной энергии непрерывным доплеровским лидаром. Оптика атмосферы и океана. 1995. т. 8, №10, с. 1457-1466.
 15. Фалиц А.В. Лазерные методы определения параметров и пространственной структуры турбулентных ветровых полей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Фалиц Андрей Вячеславович. – Томск, 2010. – 22 с.
 16. Смалихо И.Н. Ветровое зондирование когерентными доплеровскими лидарами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05 / Смалихо Игорь Николаевич. – Томск, 2011. – 315 с.
 17. Брысин Н.Н. Разработка лазерного доплеровского анемометра для контроля скорости ветра в приземном слое атмосферы: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Брысин Николай Николаевич. – М., 2005. – 168 с.
 18. Матвиенко Г.Г. – Оптика атмосферы, 1988, т.1, №6, с. 3 – 15.
 19. Сигналы и помехи в лазерной локации / В. М. Орлов, И. В. Самохвалов, Г. М. Креков и др.; Под ред. В. Е. Зуева. – М.: Радио и связь, 1985 – 264 с.,ил.
 20. Мишина О.А. Методы и алгоритмы обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Мишина Ольга Александровна. – СПб., 2012. – 156 с.

21. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология: учебное пособие для летного и диспетчерского состава ГА. – Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. – 113 с.
22. Стадник С.В. Инновационное развитие системы управления безопасностью полетов государственной авиации: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Стадник Сергей Валерьевич. – М., 2013. – 25 с.
23. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами: методическое пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Росгидромет, 2009. – 57 с.
24. Бернгардт Р.П. Климатологические обобщения и применение информации о скорости ветра и гололеде. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2003. 96 с.
25. Зубащенко Е.М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 1. / Е.М. Зубащенко, В.И. Шмыков, А.Я. Немыкин, Н.В. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 183 с.
26. Ананова Л.Г. Сдвиги ветра при шквалах на аэродроме Томск // Метеоспектр, №2, 2010. – С. 100-104.
27. Юркин Ю.А. Летная эксплуатация ЛА. Ч. 2. Учебное пособие. 2011. – 63 с.
28. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. Учеб. Пособие для ун-тов. Изд. 2-е, испр. и доп. М., «Высш. Школа», 1978.
29. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 512 с.
30. Калинин Н.А. Метеорологические информационно-измерительные системы и комплексы: метод. Пособие / Н.А. Калинин, И.С. Заморин, Н.И. Толмачева; Перм. Ун-т. – Пермь, 2007. – 334 с.

31. В. М. Захаров, О. К. Костко. Метеорологическая лазерная локация. Л., Гидрометеиздат, 1977, 222 с.
32. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1983. 536 с.
33. Савин А.В., Коняев М.А. Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов // Метеоспектр. 2008. №1. С. 147–152.
34. Борейшо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Власов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В. Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квантовая Электроника. 2005. №12(35). С.1167-1177.
35. Gordienko V.M., Koryabin A.V., Kravtsov N.V., Firsov V.V. Wind Doppler lidar with 1.5 μ m fiber laser // Laser Physics Letters. 2008. vol. 5. issue 5. p. 390-393
36. Борейшо А.А., Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Заморин И.С., Пенкин М.С., Ключков Д.В. Место и роль лидарного профилометра в системе метеообеспечения аэропорта // «МЕТЕОСПЕКТР». – 2012. - №4, - С. 62-67.
37. Lidar Wind Technologies [Электронный ресурс]: WINDCUBEv2: Reduce uncertainty and increase profitability. 2012. URL: <http://www.lidarwindtechnologies.com> (дата обращения: 05.10.2012)
38. ZephIR 300 [Электронный ресурс]: ZEPHIR 300. URL: <http://www.yourwindlidar.com/zephir-300> (дата обращения: 05.10.2012)
39. Sgurr energy [Электронный ресурс]: Galion Lidar wind profiler. URL: <http://www.sgurrenergy.com/galion-lidar> (дата обращения: 05.10.2012)
40. Lockheed Martin [Электронный ресурс]: WindTracer. URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/windtracer.html> (дата обращения: 05.10.2012)

41. Брысин Н.Н. Разработка лазерного доплеровского анемометра для контроля скорости ветра в приземном слое атмосферы: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.13. – Москва, 2005. – 168 с.
42. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 343 с.
43. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. / Перевод под ред. А. А. Черникова. - Л.: Гидрометеиздат, 1988.-513 с.
44. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиолокационной метеорологии // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т.26. №1. С.47-54.
45. Стерлядкин В.В., Желтов А.В. Применение методов доплеровской томографии при ветровом зондировании пограничного слоя атмосферы // Журнал радиоэлектроники (электронный). 2012. №12.
46. Калашников В.В. Применение информационно-измерительных систем в метеорологии гидрологии. - М.: Машиностроение, 2000. - 231 с.
47. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя.// 2001, Томск, СО РАН, 280 с.
48. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва, Наука, 1985, 198 с.
49. Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Клочков Д.В., Коняев М.А., Пенкин М.С., Орлов А.Е., Петров Г.А., Царев З.С., Шаталов И.В., Ширяев И.Ф. Доплеровский лидарный профилометр для измерения параметров ветра // Измерительная техника.- 2013. - №6. - С. 35-39.
50. Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Клочков Д.В., Коняев М.А., Пенкин М.С., Орлов А.Е., Петров Г.А., Царев З.С., Шаталов И.В., Баранов Н.А., Каневский М.И., Тезадов Я.А. Лидарный доплеровский профилометр для измерения параметров ветра в составе наземного комплекса

- метеорологического обеспечения аэронавигации // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. №9. – С. 41-52.
51. Солодухо Н.М. Манифест ситуационного движения // Вестник Татарстанского Отделения Российской Экологической Академии. - Казань, 2003, №3, С. 3-4.
52. Ахметьянов В.Р. Философские аспекты ситуационного движения // Вестник КРСУ. 2012. Том 12. № 3. С. 74-78.
53. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. – 213 с.
54. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. - 288 с.
55. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Подход к разработке требований к информационному обеспечению систем дистанционного зондирования окружающей среды. Региональная информатика – 2008 (РИ – 2008). XI Санкт-Петербургская международная конференция. Санкт-Петербург, 22 – 24 октября 2008 г.: Материалы конференции \ СПОИСУ. – СПб, 2008. с. 258 – 259.
56. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Ветровой когерентный доплеровский лидар как элемент системы дистанционного мониторинга атмосферы. Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 8: Сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 14-17.03.2007, Санкт-Петербург, Россия / Под ред. А.П.Кудинова, Г.Г.Матвиенко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. с. 94.
57. Бабиков Ю. Л., Гендрин А. Г., Калайда В. Т. Принципы построения баз знаний для решения задач дистанционного зондирования. Информационно-программное обеспечение задач атмосферной оптики. – Новосибирск: Наука, Сиб.отд-ние, 1988.

58. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Интеллектуальные информационные технологии мониторинга состояния космических средств на основе измерительной информации в реальном времени. Особенности развития космической отрасли России и перспективы её дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей. Междунар. научно-практич. конференция. 2-3 октября 2007 г. СПб: тезисы докладов \ СПб., 2007 г. с. 196 – 198.
59. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Взаимосвязь информационного обеспечения ветрового когерентного доплеровского лидара и системы поддержки принятия решений ситуационного центра. // Молодежь. Техника. Космос: труды II Общероссийской молодежной научно-технической конференции. 17 -19 марта 2010 г., Санкт-Петербург, Россия. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб: 2010. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», №8) – С. 23 – 25.
60. Борейшо А.А., Васильев Д.Н., Коняев М.А., Орлов А.Е., Шаталов И.В. Устройство для дистанционного измерения скорости ветра. Патент РФ на полезную модель №121379, кл. G 01 W 1/00. - 2012.
61. Бабкин В.И. и др. Системы обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов. М.: Наука. 2008. 373 с.
62. Bilbro J.M. Atmospheric laser Doppler velocimetry: an overview // *Optical Engineering*. 1980. V. 20. N 12. P. 2048-2054.
63. Köpp F., Schwiesow R.L., Werner Ch. Remote measurements of boundary layer wind profiles using a cw Doppler lidar // *Journal of Climate Applied Meteorology*. 1984. V.23. N1. P. 148-158.
64. Hall F. F., Huffaker R. M., Hardesty R. M., Jackson M. E., Lawrence T. R., Post M. J., Richter R. A., Weber B. F. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar // *Applied Optics*. 1984. V. 23. N 15. P. 2503-2506.

65. Kane T.J., Kozlovsky W.J., Byer R.L., Byvik C.E. Coherent laser radar at 1.06 μm using Nd:YAG lasers // *Optics Letters*. 1987. V. 12. P. 232-241.
66. Kavaya M.J., Henderson S.W., Magee J.R., Hale C.P., Huffaker R.M. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar systems // *Optics Letters*. 1989. V. 14. P. 776-778.
67. Henderson S.W., Hale C.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. Eye-safe coherent laser radar system at 2 μm using Tm. Ho: YAG lasers // *Optics Letters*. 1991. V. 16. P. 773–775.
68. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1993. V. 31. N 1. P. 4–15.
69. Hawley J.G., Tang R., Henderson S.W., Hale C.P., Kavaya M.J., and Moerder D. Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment. // *Applied Optics*. 1993. V. 32. P. 4557-4567.
70. Gordienko V.M., Kormakov A.A., Kosovsky L. A., Kurochkin N. N. Pogosov G.A., Priezhev A.V., Putivskii Y.Y. Coherent CO₂ lidars for measuring wind velocity and atmospheric turbulence // *Optical Engineering*. 1994. V. 33. N 10. P. 3206-3213.
71. Rahm S. Measurement of a wind field with an airborne continuous-wave lidar // *Optics Letters*. 1995. V. 20. P. 581-599.
72. Huffaker R.M., Hardesty R.M. Remote Sensing of Atmospheric Wind Velocities Using Solid-State and CO₂ Coherent Laser Systems // *Proc. IEEE*. 1996. V. 84. P. 181–204.
73. Drobinski Ph., Dabas A., Flamant P.H. Remote Measurements of Turbulent Wind Spectra by Heterodyne Doppler Lidar Technique // *Journal of Applied Meteorology*. 2000. V.39. P.2434–2451.
74. Werner Ch., Flamant P.H., Reitebuch O., Kopp F., Streicher J., Rahm S., Nagel E., Klier M., Herrmann H., Loth C., Delville P., Drobinski Ph., Romand B., Boitel Ch., Oh D., Lopez M., Meissonnier M., Bruneau D.,

- Dabas A. Wind Infrared Doppler Lidar Instrument // Optical Engineering. 2001. V. 40. N 1. P.115–125.
75. Reitebuch O., Werner Ch., Leike I., Delville P., Flamant P.H., Cress A., Engelbart D. Experimental Validation of Wind Profiling Performed by the Airborne 10 μm Heterodyne Doppler Lidar WIND // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V.18. N 8. P.1331-1344.
76. Reitebuch O., Volkert H., Werner Ch., Dabas A., Delville. P., Drobinski Ph, Flamant P.H., Richard E. Determination of Air Flow Across the Alipine Ridge by a Combination of Airborne Doppler Lidar, Routine Radiosounding and Numerical Simulation // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2003. V.129. P.715–728.
77. Ando T., Furuta M., Tanaka H., Nagashima M., Kameyama S., Suzuki J., Hirano Y. Development of Low Cost All Coherent Doppler LIDAR (CDL) System // Proceedings of the 13th Coherent Laser Radar Conference. Kamakura, Japan. 2005. P.170–173.
78. Hannon S.M., Pelk J.V., Henderson S.W. Recent wind and aerosol measurements using WindTracer // Proceedings of the 13th Coherent Laser Radar Conference. Kamakura, Japan. 2005. P.84-87.
79. Hannon S.M. Wind resource assessment using long range pulsed Doppler lidar // Proceedings of the 15th Coherent Laser Radar Conference. Toulouse, France. 2009. P.59-62.
80. Parmentier R., Boquet M., Cariou J.P., Sauvage L. WindcubeTM pulsed lidar compact wind profiler: Overview on more than two years of comparison with calibrated sensors at different location // Proceedings of the 15th Coherent Laser Radar Conference. Toulouse, France. 2009. P.267-270.
81. Chanin M.L., Garnier A., Hauchecorne A., Porteneuve J. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere // Geophys. Re. Lett. 1989. V. 16. P. 1273-1276.

82. Rees D., McDermid I.S. Doppler lidar atmospheric wind sensor: Reevaluation of a 355-nm incoherent Doppler lidar // *Applied Optics*. 1990. V. 29. P. 4133-4157.
83. Post M.J., Richter R.A., Keeler R.J., Hardesty R.M., Lawrence T.R., Hall F.F. Calibration of coherent lidar target // *Applied Optics*. 1980. V. 19. N 16. P. 2828-2832.
84. Harris M., Pearson G.N., Ridley K.D., Karlsson C.J., Olson F.A., Letalik D. Single-particle laser Doppler anemometry at 1.55 μm // *Applied Optics*. 2001. V.40. N 6. P. 969 - 973.
85. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. – 304 с.
86. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений/ Т.С.Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г. Дж. Нуссбаумер и др.; Под ред.Т.С.Хуанга: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
87. Ахметьянов В.Р. Устройство для сглаживания сигналов. - Авторское свидетельство СССР №1292010, кл. G 06 F 15/36. - 1987.
88. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Обработка данных ветрового когерентного доплеровского лидара на основе метода гауссовой аппроксимации. // *Изв. Вуз. Приборостроение*. 2010.Т.53, №1, С.20– 26.
89. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Метод оценивания положения максимума колоколообразной функции с использованием порядковых статистик. // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2010. № 7. с. 83 – 87.
90. Ахметьянов В.Р., Мишина О.А. Методика и результаты моделирования сигнала в ветровом когерентном доплеровском лидаре. Четвертые Уткинские чтения: материалы международ. науч.-техн. конф. Т.1 / Балт.гос.техн.ун-т. – СПб., 2009. с. 57 – 59.
91. Веснин В.Л. Метод гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического брэгговского датчика//*Известия*

- Самарского научного центра РАН, Общая физика и электроника, том 5, № 1, 2003 год, стр. 156-164.
92. Ахметьянов В.Р., Васильев Д.Н., Коняев М.А., Мишина О.А., Пенкин М.С., Петров Г.А., Тезадов Я.А., Шаталов И.В., Ширяев И.Ф. Методы и алгоритмы обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием // Журнал радиоэлектроники (Электронный). – 2013. №10. – С. 20.
93. Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы. Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн [Электронный ресурс]: Конспекты лекций / III Всероссийские Армандовские чтения: молод. шк. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2013. С. 24-42.
94. Sonnenschein C.M., Horrigan F.A. Signal-to-noise relationship for coaxial systems that heterodyne backscatter from the atmosphere // Applied Optics. 1971. V. 10. N7. P. 1600-1604.
95. Köpp F., Schwiesow R.L., Werner Ch. Remote measurements of boundary layer wind profiles using a cw Doppler lidar // Journal of Climate Applied Meteorology. 1984. V.23. N1. P. 148-158.
96. М. Андреев, Д. Васильев, М. Пенкин, С. Смоленцев, А. Борейшо, Д. Клочков, М. Коняев, А. Орлов, А. Чугреев. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки. // Научно-технический журнал «Фотоника». - 2014. №6. - С. 20-29.
97. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // Труды МФТИ. — 2009. — Т. 1. — № 3. — С. 73-93.
98. Баранов Н. А., Белоцерковский А. С., Каневский М. И., Турчак Л. И. Моделирование вихревой безопасности полетов. Москва: Наука, 2013. – 436 с.

99. Босняков, И. С. Модели разрушения дальнего вихревого следа за самолётом: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Босняков Игорь Сергеевич. – М., 2016. – 100 с.
100. Орлов А.Е., Баранов Н.А., Андреев М.А., Пенкин М.С. Моделирование режимов и параметров процесса дистанционного мониторинга вихревых следов самолетов // Лазерная и ракетно-космическая техника XXI века: сборник научных трудов / Под. ред. В.А. Бабука и А.С. Борейшо; Балт. гос. техн. ун-т.- СПб., 2016. с. 123-131.
101. Пенкин М.С., Борейшо А.С., Коняев М.А., Орлов А.Е., Баранов Н.А. Детектирование вихревого следа самолета с помощью когерентного доплеровского лидара. // Инженерно-физический журнал - 2017. Том 90. № 4 (июль-август). - С. 997-1004.
102. Баранов, Н.А., Васильев, Д.Н., Коняев, М.А., Лемищенко, Е.В., Орлов, А.Е., Пенкин, М.С. Полевые испытания лазерного сканера вихревых следов. // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем – 2017. №1. - С.43-51.