

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"**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Санкт-Петербург - 2018**

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете  
"ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

**Научный  
руководитель:** кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО  
«НПО «ЛЕПТОН»  
Ахметьянов Валерий Равизович

**Официальные  
оппоненты:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
лазерных измерительных и навигационных систем федерального  
государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)  
Филатов Юрий Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор  
кафедры «Физика» федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технологический университет»  
Стерлядкин Виктор Вячеславович

**Ведущая  
организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная  
геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г. в \_\_\_\_ часов \_\_\_\_  
минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.01 по защите докторских и  
кандидатских диссертаций в федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный  
гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург,  
Малоохтинский пр.,98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного  
гидрометеорологического университета и на сайте:  
<http://www.rshu.ru/university/dissertations/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью  
организации, просим направлять в адрес диссертационного совета  
Д 212.197.01 в ФГБОУ ВО «РГГМУ»: 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул.,  
дом 79.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.  
Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.197.01  
кандидат физико-математических наук, доцент



Кашлева Лариса Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 07 июля 2011 г. №899 технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды отнесены к критическим технологиям РФ. Оперативный высокоточный мониторинг текущей ветровой обстановки очень важен в районе крупных аэропортов с целью обеспечения безопасности полётов, для исследования атмосферных вихрей в задаче прогнозирования погодных условий, а также при проведении экологического мониторинга в местах выброса в атмосферу загрязняющих веществ. Традиционным методом оценивания скорости ветра является использование прямых датчиков или акустических анемометров, устанавливаемых на метеорологических мачтах. Однако для определения параметров структуры поля скоростей ветра в настоящее время все большее распространение получают системы дистанционного зондирования. Они обладают несравнимо большей оперативностью, информативностью и точностью.

Все дистанционные методы оценивания скорости ветра можно разделить на четыре класса: радиолокационные, акустические, радиоакустические и лидарные. Основные ограничения аппаратуры первых трёх методов заключаются в том, что:

1. Радиолокационные устройства не позволяют измерить параметры ветра при отсутствии осадков или специальных трассеров в атмосфере.
2. Радиоакустическая аппаратура чрезвычайно чувствительна к искажению формы фронта отраженного от акустической волны радиосигнала.
3. Применение акустических систем эффективно в случае низкого уровня акустических шумов. Поэтому использование такой аппаратуры при наличии высоких шумовых помех, например, на аэродромах, практически невозможно.

Методы дистанционного получения профиля ветра в атмосфере с помощью доплеровских лидаров основаны на использовании когерентного импульсного или непрерывного 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.

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.

Особую актуальность приобретает разработка современных, простых в обслуживании, надежных и компактных ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров непрерывного типа с коническим сканированием. В настоящее время профилометры указанного типа 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 этих систем. Применение сложных и перспективных методов обработки сигналов ветровых лидаров ранее ограничивалось недостатком вычислительных мощностей. Однако, постоянное развитие технологий цифровой обработки данных, как на аппаратном, так и программном уровнях, позволяет применять все более сложные методы обработки сигналов 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 факторов делает задачу обоснования, разработки и исследования как моделей образования и развития сдвига ветра и вихревых следов в пограничном слое атмосферы, так и новых эффективных методов и алгоритмов обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров непрерывного типа с коническим сканированием весьма актуальной.

**Объект исследования:** ветровой когерентный доплеровский лидарный профилометр непрерывного типа с коническим сканированием в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

**Предмет исследования:** математическое и программно-алгоритмическое обеспечение ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности.

**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.

**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.

**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 Межгосударственного авиационного комитета 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.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует п.1- «Атмосферные процессы в полярных, умеренных и тропических широтах и их моделирование», п.8 - «Облака, аэрозоли, осадки; спутниковые и радиолокационные исследования» и п.10 - «Пограничные слои в атмосфере и океане» паспорта научной специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология».

**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” (СПб, 24-26 мая и 4-5 декабря 2012 г.); Международной научной конференции “Лазеры. Измерения. Информация.” (СПб, 5-7 июня 2012 г.); “15<sup>th</sup> International Conference on Laser Optics (LO - 2012)” (St.Petersburg, Russia, June, 25-29, 2012.); Юбилейной XIII Санкт-Петербургской международной конференции “Региональная информатика (РИ–2012)” (СПб, 24 – 26 октября 2012 г.); а также на заседании «Состояние и перспективы лазерной локации атмосферы и подстилающей поверхности» семинара «Дистанционные методы зондирования природной среды» (СПб, ВКА им. А.Ф.Можайского, 16 мая 2013 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 работ, включая 3 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 4 статьи в отраслевых журналах и 5 работ в материалах международных научно-технических конференций.

**Личный вклад автора.** Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 102 наименований. Основная часть работы содержит 146 страниц, 49 рисунка и 7 таблиц.

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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна и указана практическая ценность работы, дана краткая характеристика содержания работы по главам.

В главе 1 «Анализ ветровых лидарных профилометров с непрерывным когерентным излучением» проведен анализ атмосферных ветровых метеоявлений с точки зрения обеспечения авиационной безопасности в аэропортах на этапах взлета и посадки воздушных судов. В результате выявлено, что ветровые процессы характеризуются высокой динамикой особенно в приземном слое атмосферы до высот в 600 - 1500 метров. Одним из наиболее опасных метеоявлений при взлете и посадке воздушных судов является сдвиг ветра. 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.

Далее рассмотрены физические основы измерения скорости ветра с использованием когерентного лазерного излучения. На основе данных, взятых из литературных источников, проведен анализ типовых систем определения скорости и направления ветра. Показано, что использование широко распространенных контактных датчиков или анемометров для определения скорости и направления ветра на траверзе взлетно-посадочной полосы невозможно. Учитывая технические возможности, присущие дистанционным радиолокационным, акустическим и оптическим датчикам, можно сделать вывод, что на современном этапе развития элементной и технологической базы наиболее перспективными являются ветровые когерентные доплеровские лидары с использованием импульсного и непрерывного лазерного излучения.

При использовании импульсного излучения диапазон дальности измерения начинается от нескольких десятков и даже сотен метров. Для когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением диапазон дальности измерения начинается от единиц метров, что важно для мониторинга ветровых характеристик атмосферы в районе взлетно-посадочной полосы аэропортов, начиная с высот от 3-5 метров.

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 разработке и совершенствовании программно-алгоритмической части, включающей в себя как математическую модель лидарного сигнала, так и методы и алгоритмы его обработки.

При разработке информационного обеспечения перспективных ветровых когерентных доплеровских лидарных профилометров с непрерывным излучением и коническим сканированием, входящих в систему метеорологического обеспечения

авиационной безопасности, необходимо использовать системный и ситуационный подходы с учетом требований и возможностей систем поддержки принятия решений на командно-диспетчерском пункте аэропортов.

В соответствии с вышесказанным в первой главе формулируется цель диссертационной работы.

В главе 2 **«Информационное обеспечение ветрового лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием»** рассмотрены вопросы организации информационного обеспечения ветрового лидарного профилометра в системе метеорологического сопровождения авиационной безопасности аэропортов при решении задач управления воздушным движением авиадиспетчерами командно-диспетчерского пункта. Содержится исследование и обоснование математической модели регистрируемого гетеродинного сигнала, а также вытекающей из нее модели измерительного процесса ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием.

Показано, что в настоящее время лидарный профилометр следует рассматривать не только как независимый отдельный датчик для получения информации о ветровых характеристиках выбранных областей атмосферы, а как элемент системы информационного обеспечения более высокого уровня. Такой системой выступает система поддержки принятия решений командно-диспетчерского пункта аэропорта, основной целью которой является оперативное обеспечение авиадиспетчеров всеми необходимыми видами информации, характеризующей состояние авиационной обстановки в районе аэропорта, которое зависит, в том числе, от ветровых характеристик окружающей области земной атмосферы.

В основе методики и алгоритма обработки сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием непрерывного типа лежит математическая модель измерительного процесса, вытекающая из математической модели гетеродинного сигнала. Допускается, 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 изменяется согласно эффекту Доплера.

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

Принцип конического сканирования приземного слоя атмосферы заключается в следующем. 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 когерентного доплеровского лидарного профилометра необходимо провести измерения, как минимум, при трех различных положениях зондирующего пучка в пространстве. В соответствии с рисунком 1, 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  $\theta$  - угол азимута лазерного луча, который изменяется в интервале  $[0; 2\pi]$ ,  $\varphi$  - угол места лазерного луча, изменяющийся в диапазоне  $[0; \pi/2]$ .

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.

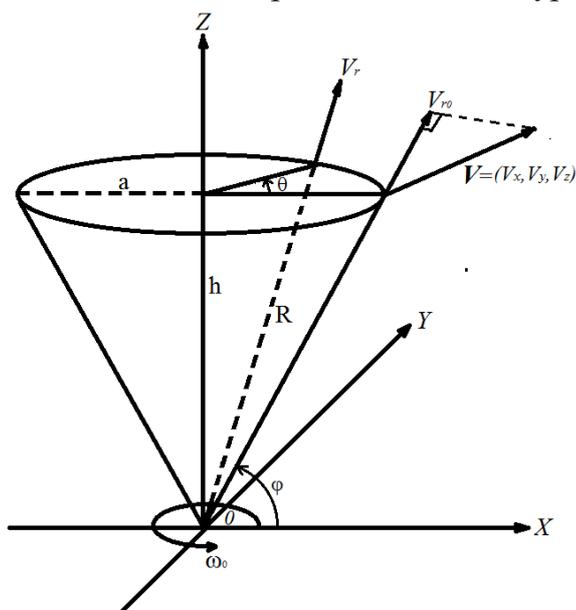


Рисунок 1 Принцип конического сканирования приземного слоя атмосферы лазерным лучом

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 когерентного доплеровского лидарного профилометра.

Ключевым моментом принципа конического сканирования является предположение о “замороженности” ветровых характеристик атмосферы за время сканирования на заданной высоте.

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.

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

$$V_r = |a + b \cdot \cos(\theta - \theta_{\max})|, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – аппроксимирующие коэффициенты. Направление ветра по азимуту определяется как угол  $\theta_{\max}$ , соответствующий максимальной положительной скорости. Величина горизонтальной составляющей скорости ветра определяется

максимумом амплитуды гармонической функции. Смещение полученной синусоидальной кривой по оси ординат соответствует величине вертикальной составляющей вектора скорости на высоте измерения. Измеряя вектор скорости на нескольких высотах, можно построить вертикальный профиль распределения ветра.

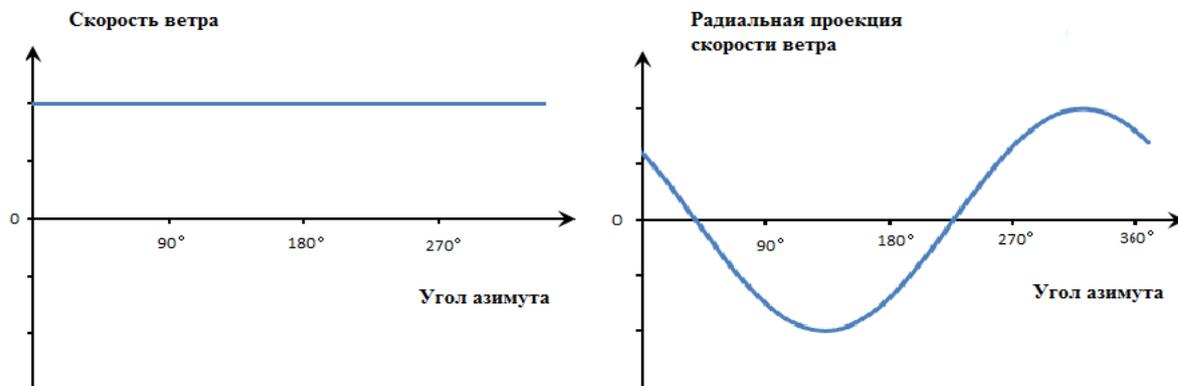


Рисунок 2 Закон изменения радиальной составляющей скорости ветра при постоянстве ветровых характеристик атмосферы при коническом сканировании

Отметим, 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.

Предлагаемая 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 когерентного доплеровского лидарного профилометра 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.

В соответствии с общим алгоритмом обработки данных когерентного доплеровского лидарного профилометра наиболее важными 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 является подавление шумов в исходных спектрах и выделение доплеровского спектра полезного сигнала, имеющего, вид, показанный на рисунке 3.

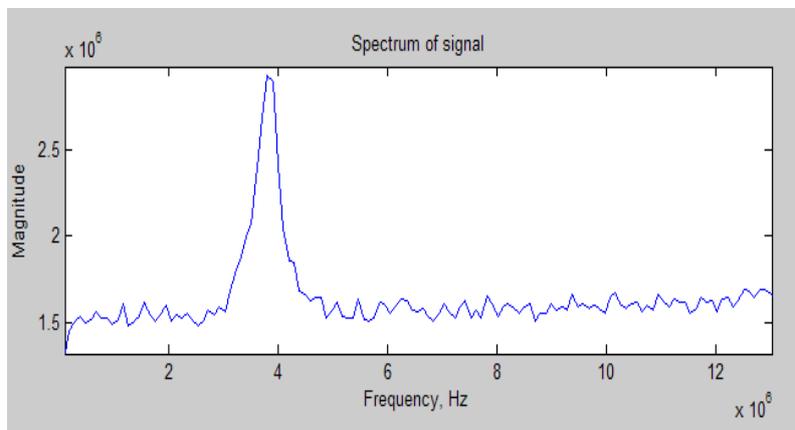


Рисунок 3 Вид доплеровского спектра полезного сигнала

доплеровского спектра полезного сигнала за полный оборот конического сканирования и результатов экспериментальных исследований в совокупности с присутствием полезного сигнала выявлено наличие шумовых или ошибочных отсчетов, для удаления которых необходимо разработать соответствующие методы и алгоритмы.

В главе 3 «Методы и алгоритмы обработки сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием» рассматриваются вопросы, связанные с обработкой гетеродинного сигнала после проведения преобразования Фурье 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.

Анализ кривой, представленной на рисунке 4 позволяет рассматривать осредненные спектры 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.

Из анализируемого сигнала на первом этапе удаляем полезный доплеровский сигнал. В этой ситуации одним из методов удаления точечных шумов и импульсной помехи является метод медианной фильтрации, относящийся к классу ранговых методов или алгоритмов. В результате применения медианной фильтрации к осредненному спектру  $S$  получается сглаженная кривая  $S'$ , вид которой показан на рисунке 5.

Когда отношение сигнал/шум велико, специальной обработки не требуется, но в реальных условиях доплеровский спектр полезного сигнала, полученный с помощью профилометра ПЛВ-300, может быть слабым или сильно зашумлённым.

В результате анализа математической модели

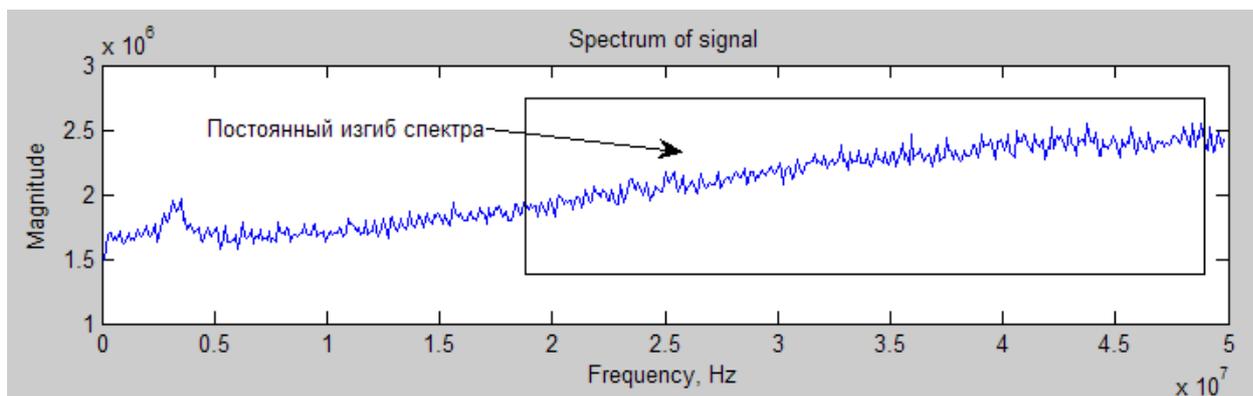


Рисунок 4 Осредненные спектры, состоящие из совокупности полезного сигнала и неравномерного спектрального фона

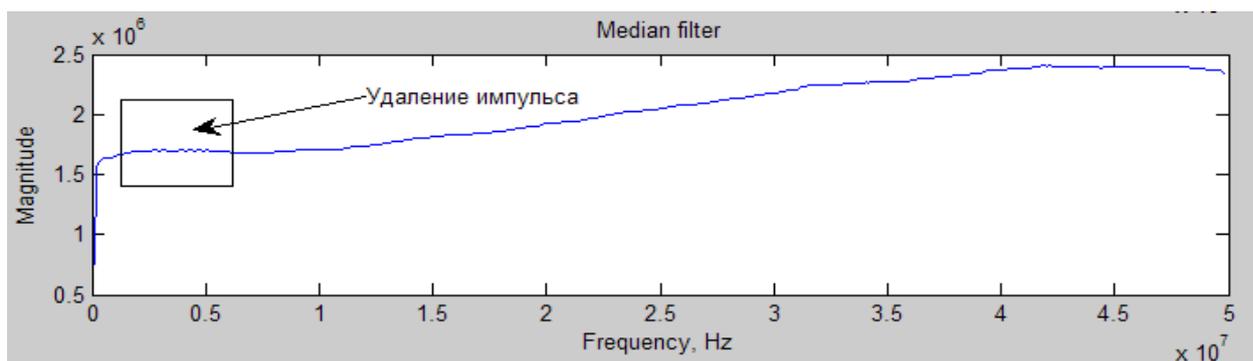


Рисунок 5 Сглаженный медианным фильтром осредненный спектр

Для наблюдения сигнала на равномерном фоне осуществляется нормировка осредненного спектра в соответствии с отношением  $S_n = \frac{S}{S'}$ .

Вид нормированного спектра показан на рисунке 6.

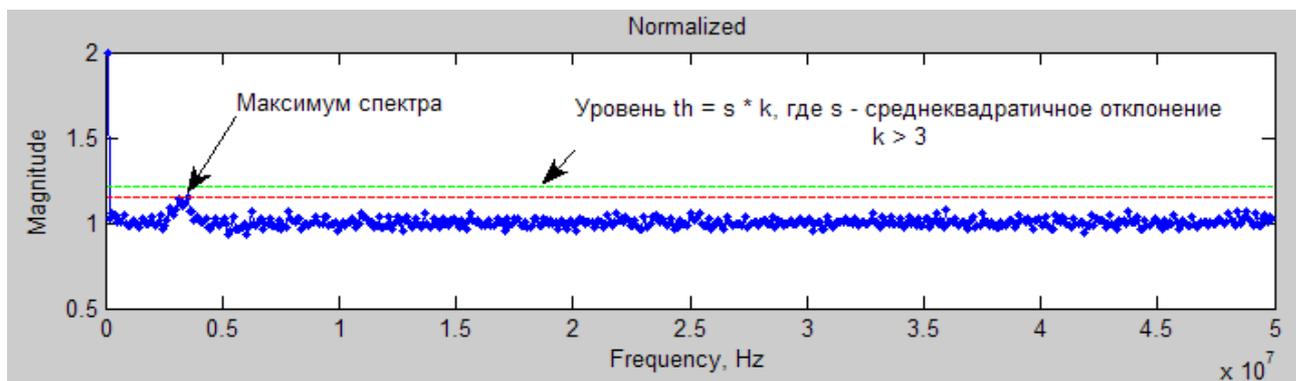


Рисунок 6 Вид осредненного спектра после нормировки

Для уменьшения влияния аддитивного шума его сглаживают усредняющим фильтром в скользящем окне, размер которого существенно меньше длительности полезного доплеровского сигнала. Использование сглаживающего фильтра на основе локального усреднения в скользящем окне обусловлено тем, что он эффективен при подавлении аддитивных шумов. В свою очередь, медианная фильтрация в скользящем окне широко используется для устранения импульсных или точечных шумов. В связи с тем, что аддитивные шумы, особенно при достаточно высоких отношениях сигнал/шум, существенно влияют на поведение младших разрядов, 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 предложен метод деления разрядной сетки. Метод деления разрядной сетки предлагается на этапе обработки осредненного спектра для одновременного удаления полезного доплеровского сигнала и подавления аддитивного шума в скользящем окне. 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 этого 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 7.

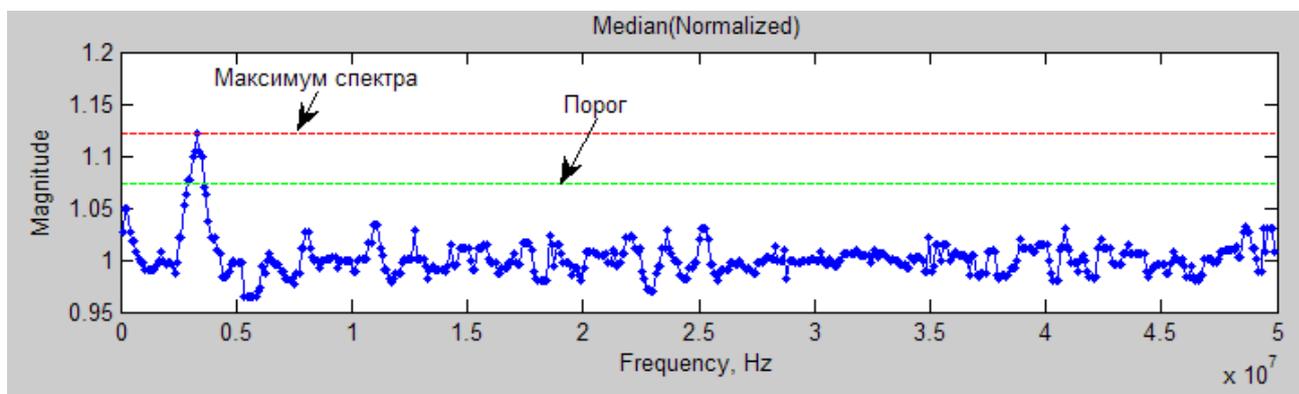


Рисунок 7 Вид осредненного спектра после нормировки и сглаживания усредняющим фильтром в скользящем окне

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  $\sigma_s$  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 7 зеленой линией.

Следующим этапом обработки после выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном является определение центральной доплеровской частоты, линейно связанной с радиальной составляющей полного вектора скорости. В результате рассмотрения известных методов определения параметров колоколообразной функции для оценки значения центральной доплеровской частоты предлагается использовать центроидный метод и метод порядковых статистик, а для определения ширины колоколообразной функции, связанной со степенью турбулентности атмосферы, метод порядковых статистик.

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.

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 удаляются до вычисления параметров аппроксимирующей функции. Это повышает точность аппроксимации, и, соответственно, точность определения параметров скорости ветра.

Для удаления выбросов из набора частот рассчитываются среднее значение ( $m$ ) и среднеквадратичное отклонение ( $s$ ) набора частот  $\bar{F}$ . 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  $\bar{P}$  (подмножество  $\bar{F}$ ) передаются в алгоритм аппроксимации.

3. На основании результатов аппроксимации формируется вектор  $\bar{P}'$  и вычисляется вектор ошибки аппроксимации  $\bar{E} = |\bar{P} - \bar{P}'|$ . Если вектор  $\bar{E}$  содержит элементы, значение которых превышает три среднеквадратичных отклонения  $t_e$ , то соответствующие элементы исключаются из  $\bar{P}$  и алгоритм возвращается в начало пункта 3. То есть для каждого  $e_i > t_e$ , исключаются  $p_i$  из  $\bar{P}$  и повторяется процедура аппроксимации (рисунок 9).

В случае успешного завершения алгоритма удаления выбросов вычисляются параметры гармонической функции.

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 (1). Её общий вид показан на рисунке 10.

Очевидно, выражение для вектора скорости имеет вид:

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

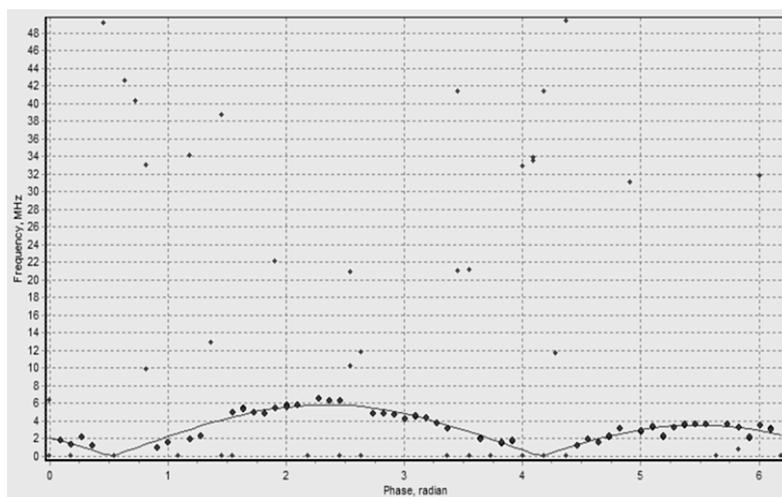


Рисунок 9 Аппроксимация полученных данных гармонической зависимостью

Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяются в соответствии с методом наименьших квадратов. Отметим, что методы, алгоритмы и сама процедура определения параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$  в рассмотренной выше постановке детально проработаны в докторской диссертации Смалихо Игоря Николаевича.

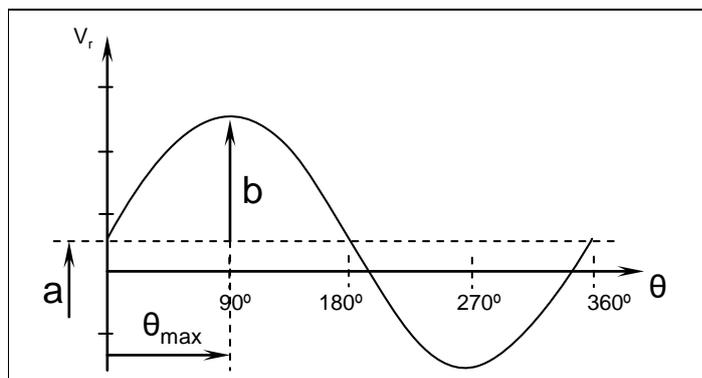


Рисунок 10 Вид аппроксимирующей функции

Для измерения вертикального профиля скорости ветра описанная серия измерений повторяется при нескольких различных фокусировках. Конечным результатом измерений является вертикальный профиль скорости ветра, измеренный в нескольких заранее заданных точках по высоте, привязанный к топографическим координатам.

В главе 4 «Обработка экспериментальных данных ветрового лидарного профилометра и рекомендации по совершенствованию его применения» рассматривается ветровой лидарный профилометр ПЛВ-300, разработанный в НПП «Лазерные системы», на котором были отработаны предложенные в работе модели сдвига ветра, методы и алгоритмы обработки информации. ПЛВ-300 представляет собой лазерный доплеровский анемометр на основе лазера непрерывного типа с коническим сканированием оптической оси приемо-передающего телескопа,

отклоненной на  $22^\circ$  относительно вертикали и возможностью изменения дистанции фокусировки. Основные технические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики лидарного профилометра ПЛВ-300.

№	Параметр	Значение
1.	Высота измерений, м	$3 \leq h \leq 300$
2.	Скорость ветра, м/с	$0,2 \div 38$
3.	Погрешность измерения скорости ветра	$\pm 0,1$ м/с
4.	Погрешность измерения направления ветра	$\leq 0,5^\circ$ при $\geq 5$ м/с, $t \leq 4$ с $\leq 1^\circ$ при $2 \dots 5$ м/с, $t \leq 4$ с $\leq 1^\circ$ при $1$ м/с, $t \leq 12$ с
5.	Длина волны лазерного излучения	1550–1570 нм
6.	Рабочая температура	$-40^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$
7.	Время выхода на режим	не более 20 мин, 10 мин при $-40^\circ\text{C}$ 1 мин при $0 \dots 30^\circ\text{C}$ , 5 мин при $+40^\circ\text{C}$ 20 мин при $+50^\circ\text{C}$
8.	Общий вес (не включая вес батарей)	$\leq 70$ кг
9.	Время сканирования на фиксированной высоте	4 сек
10.	Разрешение по высоте	$\leq \pm 10\%$ при высоте измерения 200 м
11.	Максимальные габариты, мм	D300 x 800 (без батарей)

В соответствии с разработанным типовым алгоритмом работы ПЛВ-300 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.

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.

Далее представлены результаты, полученные в ходе сертификационных испытаний, которые проводились с 19<sup>30</sup> 09 августа до 10<sup>00</sup> 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 2 в виде результатов выборки 9967 значений с дискретностью в 4 секунды для высоты 121 м. Одно измерение соответствует осредненным за две минуты данным. Период следования данных составляет четыре секунды.

Таблица 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 – $\pm 0.5$ м/с (скорость $\leq 5$ 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)	$m( V_{ДПЛВ} - V_{ДВММ} )$ [м/с]	0,23
	$m( \alpha_{ДПЛВ} - \alpha_{ДВММ} )$ [град]	0,98
Оценка СКО ПЛВ по скорости и направлению ветра	$E_V$ [м/с]	0,288
	$E_\alpha$ [град]	4.38

Погрешности измерений скорости и направления ветра 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) %.

По результатам проведенных проверок на соответствие сертификационным требованиям было установлено, что разработанный лидарный ветровой профилометр с монитором оператора ПЛВ-300 успешно прошел, необходимые испытания и может использоваться в системе авиационной безопасности.

Учитывая, что для эффективного решения задач авиационной безопасности в зоне аэропорта требуется оперативная осведомленность о ветровой обстановке на дальностях до 1000 и более метров в работе рекомендуется в совокупности с профилометром непрерывного типа ПЛВ-300 использовать когерентный доплеровский лидарный профилометр с импульсным излучением типа ПЛВ-2000, который также разработан в НПП «Лазерные системы» и эффективно эксплуатируется, в системе вихревой безопасности.

В работе проведены экспериментальные исследования по измерению вихревого следа ряда самолетов в приземном слое атмосферы в районе аэропорта Пулково. Основываясь на математических моделях вихревого следа, 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. 11.

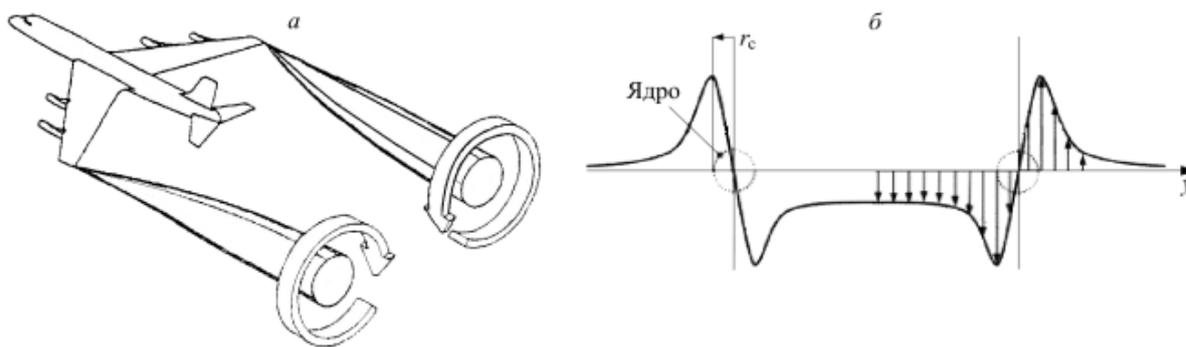


Рисунок 11 Вихревой след за самолетом: а — образование пары вихрей; б — распределение радиальной скорости.

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.

Серия проведенных экспериментальных исследований 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 3.

Таблица 3 - 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	$\pm 0.5$
Длина волны лазерного излучения, нм	$1560 \pm 10$

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

Схема расположения когерентного доплеровского лидара относительно ВПП и его внешний вид показаны на рис. 12. Результаты детектирования вихревых следов за самолетом с помощью сканера вихревых следов в режиме RHI (range height indicator) в реальном времени представлены на рис. 13. На рис. 13а иллюстрируется ветровое поле с характерным для вихрей (выделено черным прямоугольником) распределением положительной и отрицательной скоростей на начальной стадии их формирования. 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).



Рисунок 12 Схема расположения лидара (б) относительно ВПП (а) и его внешний вид.

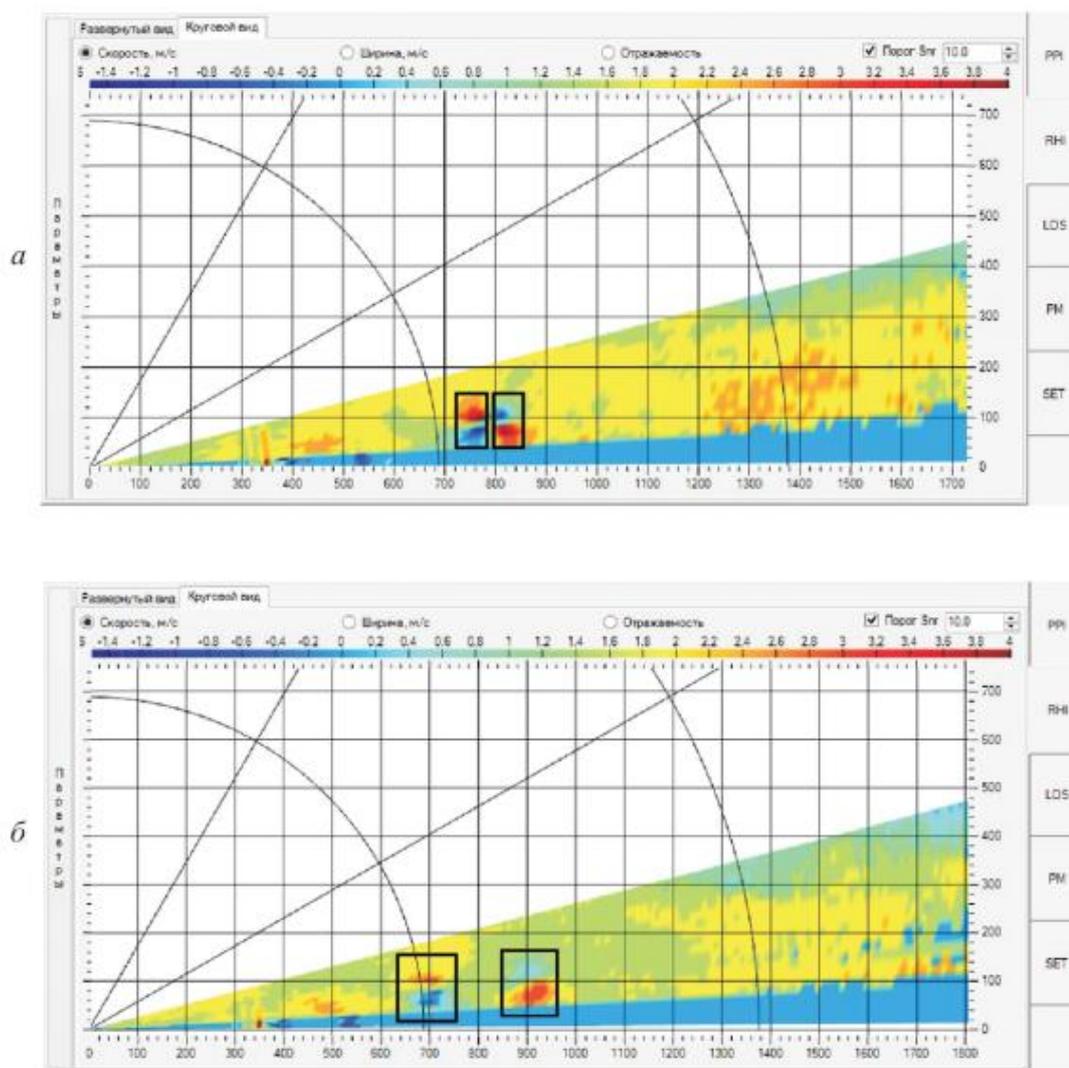


Рисунок 13 Вихревой след за самолетом Боинг 737-800 на начальной стадии его развития (а) и через 2 мин 43 с (б).

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

В заключении кратко перечислены основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

1. Показано, что в результате роста интенсивности воздушных перевозок актуальным является вопрос повышения уровня авиационной безопасности, в том числе на этапе взлета и посадки. Сделан вывод о необходимости мониторинга ветровой обстановки, а именно таких опасных метеоявлений, как сдвиг ветра и вихревой след самолета.

2. В результате анализа контактных и дистанционных методов и средств мониторинга ветровой обстановки в приземном слое атмосферы в районе взлетно-посадочной полосы в диапазоне высот от единиц метров до нескольких сотен метров обоснована перспективность использования в системе метеорологического обеспечения авиационной безопасности когерентных доплеровских лидарных профилометров с непрерывным излучением и коническим сканированием пространства.

3. Показано, что математическая и программно-алгоритмическая части информационного обеспечения когерентного доплеровского лидарного профилометра 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. Построена математическая модель сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра с непрерывным излучением и коническим сканированием в предположении, что за время сканирования ветровые характеристики атмосферы существенно не изменяются. Разработана схема процесса измерений, а также алгоритма обработки лидарного сигнала.

5. В соответствии с построенной математической моделью усредненный спектр лидарного сигнала содержит совокупность доплеровского спектра полезного сигнала и неравномерного спектра фона. В условиях гауссовской природы отраженного от аэрозоля лазерного сигнала принято, что вид доплеровского спектра полезного сигнала можно считать колоколообразным.

6. В основе разработанного метода выделения полезного сигнала из смеси с неравномерным спектральным фоном лежит последовательное применение алгоритмов скользящей медианной фильтрации и скользящего усреднения с изменяемым размером скользящего окна. Для эффективного подавления импульсной помехи скользящее окно медианной фильтрации должно иметь размер, более чем вдвое превышающий длительность колоколообразной функции, которой описывается полезный доплеровский сигнал.

7. С целью уменьшения времени обработки сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра предложен метод одновременного сглаживания данных,

представленных старшими разрядами, алгоритмом скользящей медианной фильтрации, а данных, представленных младшими разрядами, алгоритмом скользящего локального усреднения.

8. Установлено, что при определении параметров колоколообразной функции наряду с этапами, связанными с операциями нормировки и пороговой обработки доплеровского спектра с целью устранения случайных выбросов, наиболее перспективным представляется метод порядковых статистик.

9. В качестве экспериментальных когерентных доплеровских лидарных профилометров, информация с которых поступала для отработки предложенных методов и алгоритмов, реализованных в составе программно-алгоритмического обеспечения, использовались как профилометр ПЛВ-300 с непрерывным излучением, так и профилометр ПЛВ-2000 импульсного типа, работающие на длине волны 1,55 мкм и разработанные при непосредственном участии автора в ООО НПП «Лазерные Системы».

10. 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.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:**

1. 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.

2. 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.

3. 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.

### **Публикации в других изданиях:**

4. Ахметьянов, В.Р., Мишина, О.А., Пенкин, М.С. Оценивание скорости ветра лидарными методами. // Высокие технологии, экономика, промышленность. Т. 1: Сборник статей Тринадцатой международной научно-практической конференции

“Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике”. 24-26 мая 2012 года, Санкт-Петербург, Россия. / Под ред. А.П.Кудинова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 17 – 19.

5. Петров, Г.А., Ахметьянов, В.Р., Ширяев, И.Ф., Пенкин, М.С., Ливенцов, Р.А. Алгоритм вычисления скорости и направления ветра сканирующим доплеровским лидаром. // Труды конференции “Лазеры, Измерения. Информация.” 5-7 июня 2012 года, Санкт-Петербург, Россия. / Под ред. Профессора В.Е.Привалова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 98.

6. Akhmetyanov, V.R., Liventsov, R.A., Penkin, M.S., Tsarev, Z.S., Shiryaev, I.F. Research of spectral linewidth influence of the laser generation on level of backscattered signal from the atmosphere. // 15<sup>th</sup> International Conference on Laser Optics” (LO - 2012). St.Petersburg, Russia, June, 25-29, 2012.: Conference materials: Lasers in environmental monitoring. / <http://laseroptics.ru/>.

7. Ахметьянов, В.Р., Пенкин, М.С. Доплеровский метеолидар для измерения скорости ветра. // Региональная информатика (РИ–2012). Юбилейная XIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ–2012)». Санкт-Петербург, 24 – 26 октября 2012 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. – СПб, 2012. - С. 330.

8. Пенкин, М.С. Ветровой доплеровский лидар. // Высокие технологии, исследования, образование, экономика. Т. 1: Сборник статей Четырнадцатой международной научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике”. 4-5 декабря 2012 года, СПб, Россия. / Под ред. А.П.Кудинова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 211 – 212.

9. Борейшо, А.А., Ахметьянов, В.Р., Васильев, Д.Н., Заморин, И.С., Пенкин, М.С., Клочков, Д.В. Место и роль лидарного профилометра в системе метеобеспечения аэропорта // «МЕТЕОСПЕКТР». – 2012. - №4, - С. 62-67.

10. Андреев, М.А., Васильев, Д.Н., Пенкин, М.С., Смоленцев, С.Г., Борейшо, А.С., Клочков, Д.В., Коняев, М.А. Орлов, А.Е., Чугреев, А.В. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки. // Научно-технический журнал «Фотоника». - 2014. №6. - С. 20-29.

11. 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.

12. 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.

Автореферат

Пенкин Михаил Сергеевич

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

Издательство Балтийского государственного технического университета «Военмех»  
имени Д. Ф. Устинова. 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.

Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

Отпечатано в типографии БГТУ.

190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.