**Мишина, Ольга Александровна. Методы и алгоритмы обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Мишина Ольга Александровна; [Место защиты: Балт. гос. техн. ун-т (ВОЕНМЕХ) им. Ф.Д. Устинова].- Санкт-Петербург, 2012.- 156 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/4124**

**На правах рукописи**

**04201270655 МИШИНА Ольга Александровна**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВЕТРОВЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ**

**Специальность 05.13.01 - "Системный анализ, управление и обработка информации"**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - кандидат технических наук В.Р.Ахметьянов

**Санкт-Петербург - 2012**

***Оглавление***

Оглавление 2

Введение 4

[Глава 1. Анализ ветровых когерентных доплеровских лидаров. 12](#bookmark7)

1. Физические основы измерения скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами. 12
2. [Обзор ветровых когерентных доплеровских лидаров. 24](#bookmark20)
3. [Обработка сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров. 35](#bookmark1)

Выводы по 1 главе. 40 Глава 2. Ситуационный подход к информационному

[обеспечению ВКДЛ. 42](#bookmark24)

1. [Ситуационный подход к управлению информационными системами. 42](#bookmark25)
2. Математическая модель сигнала ветрового

когерентного доплеровского лидара. 55

1. Модель спектра сигнала ветрового

когерентного доплеровского лидара. 75

Выводы по 2 главе. 80 Глава 3. Обоснование и выбор методов и алгоритмов обработки

сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара.. 82

* 1. [Обоснование структурной схемы обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара. 82](#bookmark62)
	2. [Аппроксимационные методы внутриимпульсной обработки. 85](#bookmark65)
		1. [Метод сплайн-аппроксимации. 86](#bookmark66)
		2. [Метод гауссовой аппроксимации. 87](#bookmark67)
	3. [Метод с использованием порядковых статистик. 89](#bookmark71)
	4. Сравнение методов внутриимпульсной обработки. 91 3.4.1. Исследование метода сплайн-аппроксимации. 93
1. [Исследование метода гауссовой аппроксимации. 95](#bookmark76)
2. Исследование метода с использованием

порядковых статистик. 98

1. Сравнение методов внутриимпульсной обработки. 100 3.5. Алгоритм рекуррентной фильтрации измерений

на этапе междуимпульсной обработки. 108

[Выводы по главе 3. 116](#bookmark93)

Глава 4. Результаты обработки экспериментальных данных и рекомендации по обоснованию структуры

информационного обеспечения. 118

* 1. Обработка экспериментальных данных

ветровых когерентных доплеровских лидаров 118

* + 1. Обработка экспериментальных данных импульсного ветрового когерентного

доплеровского лидара 118

* + 1. Обработка экспериментальных данных непрерывного ветрового когерентного доплеровского лидара с коническим сканированием 129
	1. [Рекомендации по обоснованию структуры информационного обеспечения. 132](#bookmark99)

[Выводы по главе 4. 136](#bookmark101)

[Заключение. 138](#bookmark102)

[Список литературы. 143](#bookmark103)

***Введение***

Оперативный высокоточный мониторинг текущей ветровой обстановки очень важен в районе крупных аэропортов с целью обеспечения безопасности полётов [1, 2, 3], для исследования атмосферных вихрей в задаче прогнозирования погодных условий [4, 5, 6, 7], а также при проведении экологического мониторинга в местах выброса в атмосферу загрязняющих веществ [8]. Традиционным методом оценивания скорости ветра является использование прямых датчиков или акустических анемометров, устанавливаемых на метеорологических мачтах [9]. 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 подразделяются на четыре класса [4]: радиолокационные, акустические, радиоакустические и лидарные.

Основные ограничения аппаратуры первых трёх методов заключаются в том, что:

1. Радиолокационные устройства не измеряют параметры ветра при отсутствии осадков или специальных трассеров в атмосфере.
2. Радиоакустическая аппаратура чрезвычайно чувствительна к искажению формы фронта отраженного от акустической волны радиосигнала. Такие искажения возникают в условиях сильной турбулентности в атмосфере.
3. Применение акустических систем достаточно эффективно только в случае низкого уровня акустических шумов. В результате, использование такой аппаратуры при наличии высоких шумовых помех, например, на аэродромах, практически невозможно.

Относительно лидарного метода необходимо отметить следующее. Достаточно высокая частота посылок зондирующего импульса лазера делает возможным отслеживание быстроменяющихся вариаций исследуемых параметров атмосферы. Пространственное разрешение, зависящее от длительности зондирующего импульса, позволяет с высокой степенью детализации определить структуру поля скоростей ветра. Использование волн оптического диапазона позволяет сделать приёмно-передающую аппаратуру лидара малогабаритной по сравнению с аналогичными радиотехническими средствами [10].

Лидарные системы подразделяются на корреляционные [11, 12, 13] и доплеровские [14, 15, 16]. Корреляционный метод использует естественную неоднородность оптических параметров атмосферы и основан на анализе флуктуаций лидарных сигналов, отражённых от нескольких пространственно- разнесенных рассеивающих объёмов. Доплеровский метод измерения скорости ветра построен на том, что при распространении в атмосфере зондирующего лазерного пучка происходит рассеяние волны на частицах аэрозоля, увлекаемых ветровым потоком. По доплеровскому сдвигу частоты регистрируемого сигнала обратного рассеяния определяется радиальная составляющая вектора скорости ветра.

Доплеровский метод по сравнению с корреляционным требует более сложной аппаратуры, но при этом характеризуется существенно большей точностью и быстродействием. Кроме того, доплеровский метод позволяет осуществлять зондирование на значительно больших расстояниях и в сложных погодных условиях [17, 18].

Одним из основных лидарных датчиков для измерения скорости ветра является ветровой когерентный доплеровский лидар (ВКДЛ) [14, 15, 19, 20].

ВКДЛ предоставляет информацию о параметрах скорости ветра в атмосфере и, в свою очередь, выступает как элемент систем более высокого уровня. В качестве таковых, как правило, выступают системы поддержки принятия решений (СППР). В условиях, когда атмосферные процессы характеризуются высокой динамикой, в СППР применяются принципы ситуационного управления [21, 22].

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 A.C., Зуева В.В., Зуева В.Е., Мальцева Г.Н., Матвиенко Г.Г., Шарова С.Н., Гордиенко В.М., Путивского Ю.Я., Вернера X., Вергена В., Кресса А., Лайке И., Штрайхера Ю., Хендерсона С., Хэннона С., Хуффакера Р., Мензиса Р., Билбро Дж. и других. Но несмотря на достигнутые успехи в настоящее время не получили должного развития вопросы, связанные с разработкой информационного обеспечения ВКДЛ в соответствии с принципами ситуационного управления, которые находят свое отражение при создании ситуационных центров. Основу информационного обеспечения составляют математическое, программное и организационно- методическое обеспечения. Применение сложных методов обработки сигналов в ВКДЛ ранее ограничивалось недостатком вычислительных мощностей. Однако постоянное развитие компьютерных технологий позволяет применять все более сложные методы обработки сигналов, в том числе в реальном масштабе времени. В результате достигаются качественно новые результаты в разработке информационного обеспечения ВКДЛ.

Эффективным подходом к исследованию новых методов и алгоритмов обработки сигналов является использование математического моделирования, развитию которого в США, России и других странах уделяется большое внимание.

Наличие отмеченных выше факторов делает весьма актуальной задачу обоснования, разработки и исследования новых методов и алгоритмов обработки сигналов ВКДЛ как составной части его математического и программного обеспечения.

**Объект исследования:** ветровой когерентный доплеровский лидар.

**Предмет исследования:** методы и алгоритмы обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара как составной части его математического и программного обеспечения.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие **задачи:**

1. Системный анализ систем обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров с целью выявления преимуществ и недостатков существующих комплексов.
2. Теоретическое исследование с целью обоснования выбора математической модели регистрируемого доплеровским лидаром сигнала.
3. Разработка и исследование методов, алгоритмов и программ обработки регистрируемого доплеровским лидаром сигналов для получения оценки скорости ветра.
4. Поиск путей повышения точности оценок скорости ветра.
5. Проверка эффективности разработанных методов и алгоритмов обработки моделируемых и экспериментальных реализаций лидарных сигналов.
6. Разработка рекомендаций по структуре информационного обеспечения и по применению методов и алгоритмов обработки сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров.

**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 изображений; математический аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Для численного исследования разработанных алгоритмов выполнялось имитационное моделирование в программном пакете МаЛаЬ. В ходе экспериментальных исследований применялись методы планирования эксперимента, статистической обработки данных.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

* 1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение модели сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара.
	2. Специальное математическое обеспечение для обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара на основе различных методов оценивания положения максимума амплитудно-частотной характеристики.
	3. Рекомендации по выбору метода точной оценки скорости ветра на основе анализа сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара.
	4. Обоснование целесообразности обработки сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара в два этапа: этапа внутриимпульсной обработки сигнала и этапа междуимпульсной рекуррентной обработки.
	5. Рекомендации по совершенствованию алгоритмов обработки путем использования рекуррентного алгоритма фильтрации калмановского типа по критерию максимума вероятности невыхода ошибки из заданной области для уточнения оценок параметров колоколообразной функции.

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

* + 1. Предложена новая модель сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара, доработанная путем введения коэффициента отражательной способности, который характеризует изменение отражающего объема.
		2. Для обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара при оценивании положения максимума амплитудно-частотной характеристики использован метод гауссовой аппроксимации, позволивший повысить точность оценки скорости ветра на сорок процентов по сравнению с ранее использовавшимися методами.
		3. Для обработки сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара при оценивании положения максимума амплитудно-частотной характеристики использован метод, основанный на использовании порядковых статистик вариационного ряда. Данный метод позволяет повысить точность оценки скорости ветра до пятидесяти процентов по сравнению с ранее использовавшимися методами. Кроме того, данный метод обладает, меньшими вычислительными затратами.
		4. Разработаны рекомендации по выбору метода обработки, основанные на сравнительном анализе точности определения скорости ветра с помощью различных методов и с использованием моделируемых и экспериментальных реализаций сигналов ветрового когерентного доплеровского лидара.
		5. На основе моделируемых и экспериментальных реализаций лидарного сигнала показано, что доплеровский спектр сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара представляет собой колоколообразную функцию.
		6. Показано, что разработанное специальное математическое обеспечение в составе ветрового когерентного доплеровского лидара является подсистемой информационного обеспечения системы поддержки принятия решений ситуационного центра.

**Практическая ценность**

Разработанные методы, алгоритмы и программные средства направлены на решение задачи обработки регистрируемого сигнала ветрового когерентного доплеровского лидара для оценки скорости ветра при обеспечении безопасности полетов в районах аэропортов, при исследовании атмосферных вихрей в задаче прогнозирования погодных условий, при проведении экологического мониторинга в местах выброса загрязняющих веществ.

**Использование результатов диссертации**

Положения, разработки и научно-практические рекомендации диссертации использованы в ООО «НПП «Лазерные системы» для' обработки регистрируемых сигналов ветровых когерентных доплеровских лидаров.

Методы и алгоритмы обработки лидарных сигналов включены в состав программно-математической части системы информационного обеспечения как импульсного, так и непрерывного ВКДЛ.

Алгоритмы обработки колоколообразных функций, основанные на разработанных методах гауссовой аппроксимации и порядковых статистик, внедрены в ходе выполнения научно-исследовательской работы Военно- космической академии имени А.Ф.Можайского. Данные алгоритмы позволили повысить точность определения положения максимума функции рассеяния точки оптико-электронной системы по сравнению с известным методом взвешивания.

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

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 22 работы, включая две статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 16 работ в материалах международных и межвузовских научно-технических конференций.

**Третья глава** посвящена вопросам, связанным с обработкой сигнала ВКДЛ. Для обработки дискретных цифровых значений искаженной шумами и помехами колоколообразной функции рассматривается центроидный метод (метод взвешивания), предлагаются и исследуются методы гауссовой и сплайн- аппроксимации и с использованием порядковых статистик вариационного ряда.

**Четвертая глава** содержит результаты обработки экспериментальных реализаций сигналов ВКДЛ рассмотренными методами. Обрабатываются данные импульсного ВКДЛ и непрерывного ВКДЛ с коническим сканированием. Вторая часть главы включает рекомендации по обоснованию структуры информационного обеспечения ВКДЛ и по применению методов и алгоритмов обработки лидарных сигналов.

В диссертационной работе подчеркивается, что методы и алгоритмы, разработанные в первую очередь для анализа данных ВКДЛ, после соответствующей модификации применимы и для решения других задач, которые сводятся к оцениванию параметра положения максимума колоколообразной функции, представленной в дискретном цифровом виде и искаженной помехами и шумами.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации поставлена и решена актуальная научная и практическая задача, которая заключается в обосновании и разработке методов и алгоритмов обработки данных ВКДЛ как составной части его математического и программного обеспечения.

В ходе работы над диссертацией получены следующие основные результаты.

Показано, что для определения скорости ветра с помощью ВКДЛ наряду с другими широкое распространение получило использование инфракрасной части оптического спектра. Существуют и разрабатываются инфракрасные системы на длине волны 10,6 мкм с использованием мощных лазеров на ССЬ и матричных фотоприемников на основе кадмий-ртуть- теллур.

Обобщены технические параметры для системы обработки сигналов ВКДЛ.

1. Диапазон скоростей ветра в атмосфере целесообразно рассматривать от 1 м/с (тихий ветер) до 60 м/с (ураган).
2. Дальность измерений от 10 м до 15 км.
3. Частота повторения зондирующих импульсов от 0,1 до 200 Гц.
4. Длительность импульса в пределах от 0,5 до 8 мкс.
5. Время наблюдения за выбранной областью атмосферы находится в пределах от 100 мкс до 48 секунд.
6. Количество зондирующих импульсов в одном сеансе наблюдения варьируется в диапазоне от 50 до 100.

Требуемые точности измерения скорости ветра зависят от рассматриваемой задачи.

Анализ известных ВКДЛ позволяет сделать вывод, что в системах обработки информации ВКДЛ с целью определения средней скорости ветра и степени турбулентности используются такие методы обработки, как поиск аргумента корреляционной функции, обработка по критерию максимума правдоподобия, спектральная обработка. Наиболее распространенным и перспективным является спектральный метод. Один из подходов для более точного нахождения максимума амплитудно-частотной характеристики регистрируемого сигнала заключается в её аппроксимации. Известные методы ориентированы только на внутриимпульсную обработку. В то же время в системах обработки известных ВКДЛ отсутствуют данные по междуимпульсной обработке.

Определено, что ВКДЛ и их системы обработки информации должны рассматриваться как информационные системы, в основе построения которых лежат системный и ситуационный подходы. Предлагается рассматривать ВКДЛ как совокупность средств, включающих аппаратное и информационное обеспечение, основу которого составляют математическое, программное и организационно-методическое обеспечение. При разработке ВКДЛ 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.

Утверждается, что благодаря современному уровню развития инфокоммуникационных технологий, в зависимости от требований, предъявляемых к ВКДЛ, возможно размещение средств информационного обеспечения как в местах размещения систем дистанционного зондирования, так и в ситуационных центрах. Такой подход к разработке ВКДЛ полезен с точки зрения экономической эффективности.

Рекомендуется использовать методы математического моделирования. Математическая модель сигнала ВКДЛ доработана путем введения нестационарного коэффициента отражательной способности, который характеризует изменение отражающего объема. Предложенная математическая модель сигнала ВКДЛ учитывает, что лидарный сигнал содержит как аддитивные, так и мультипликативные шумы, приводящие к ошибкам определения параметров доплеровского спектра. Искажения сигнала также возникают из-за дискретности информации.

В результате анализа экспериментальных данных, полученных с помощью импульсного и непрерывного ВКДЛ, а также имитационного моделирования сигнала ВКДЛ установлено, что возможно представление области пика доплеровского спектра колоколообразной функцией. Для оценки ветровых характеристик атмосферы необходимо определить такие параметры колоколообразной функции, как положение и значение ее максимума, а также ее ширина на заданном уровне.

Для обработки дискретных цифровых значений искаженного шумами и помехами регистрируемого лидарного сигнала рассмотрен центроидный метод (метод взвешивания), предложены и исследованы методы гауссовой и сплайн-аппроксимации, а также метод с использованием порядковых статистик вариационного ряда.

В результате моделирования установлено следующее.

Ошибка определения скорости ветра при центроидном методе в среднем в 2-4 раза больше по значению, чем при использовании других рассматриваемых методов.

При использовании гауссового метода после второго-третьего шага итерационного процесса оценка скорости ветра стремится к постоянной величине. Установлено, что гауссовый метод приводит к лучшим результатам по сравнению с методами использования кубических сплайнов.

Ошибка оценивания скорости ветра методом с использованием порядковых статистик в среднем на 20-50% меньше, чем при применении метода гауссовой аппроксимации; и на 70-100 % меньше, чем при применении метода аппроксимации кубическими сплайнами.

В результате анализа вычислительных затрат установлено, что рассматриваемые методы по степени увеличения вычислительных затрат располагаются в следующем порядке: метод с использованием порядковых статистик, центроидный метод, метод аппроксимации кубическими сплайнами, гауссовый метод.

В качестве экспериментальных ВКДЛ, информация с которых использовалась для отработки предложенных методов и алгоритмов, выбраны импульсный ВКДЛ, работающий на длине волны 10,6 мкм, и непрерывный ВКДЛ с коническим сканированием, работающий на длине волны 1,55 мкм, разработанные в ООО HI III «Лазерные Системы». Результаты обработки сигнала, полученного импульсным ВКДЛ, показали, что центроидный метод дает оценку скорости ветра в районе топографической мишени в диапазоне от четырех до шести метров в секунду, а остальные методы дают примерно одинаковую оценку, которая лежит в диапазоне от семи до девяти метров в секунду. В соответствии с результатами математического моделирования оценка скорости ветра в районе топографической мишени лежит в диапазоне от семи до девяти метров в секунду. При применении непрерывного ВКДЛ с коническим сканированием для оценки скорости ветра на высоте нескольких сотен метров от поверхности земли целесообразно использовать методы гауссовой аппроксимации и порядковых статистик. Данные методы характеризуются наименьшим разбросом. С учетом меньших вычислительных затрат по сравнению с методом гауссовой аппроксимации на практике в качестве основного рекомендуется использовать метод порядковых статистик.

Из анализа временной структуры сеанса наблюдения выбранного участка атмосферы с помощью ВКДЛ показано, что обработка информации должна быть двухэтапной и состоять из этапов внутриимпульсной и междуимпульсной обработки. На этапе внутриимпульсной обработки определяются такие параметры, как значение положения максимума и ширина на заданном уровне АЧХ. Оценка положения максимума линейным образом связана с оценкой средней скорости ветра. А оценка ширины - с оценкой турбулентности атмосферы в контролируемой области. Так как в течение сеанса наблюдения обрабатывается от пятидесяти до ста импульсов, то для уточнения оценок параметров АЧХ целесообразным является использование рекуррентного алгоритма фильтрации калмановского типа.

В условиях, когда средняя скорость ветра характеризуется невысокой динамикой, которая хорошо аппроксимируется полиномом второй или третьей степени, для уточнения, как оценок средней скорости ветра, так и оценок степени мелкомасштабной турбулентности следует использовать алгоритм рекуррентной фильтрации по типу Калмана. В случае, когда оценки средней скорости ветра при внутриимпульсной обработке в течение сеанса наблюдения меняют знак, для оценки степени крупномасштабной турбулентности целесообразно использовать алгоритмы фрактального анализа. При этом для уточнения оценок степени мелкомасштабной турбулентности по-прежнему используются алгоритмы рекуррентной фильтрации по типу Калмана.

На основе ситуационного подхода предложен выбор структуры системы информационного обеспечения при использовании как мобильных, так и стационарных ВКДЛ в зависимости от задач, решаемых ситуационными центрами при управлении воздушным движением, мониторинге экологической обстановки, метеорологических исследованиях, а также в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

В диссертационной работе также подчеркивается, что методы и алгоритмы, разработанные в первую очередь для анализа данных ВКДЛ, после соответствующей модификации пригодны и для решения других задач, которые сводятся к оцениванию параметра положения максимума колоколообразной функции, представленной в дискретном цифровом виде и искаженной помехами и шумами.

Дальнейшие исследования по теме диссертации целесообразно проводить в направлении получения дополнительной информации путем междуимпульсной обработки, а также совершенствования разработанных методов обработки в условиях турбулентности ветрового потока.