

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Пенкина Михаила Сергеевича «Методы и алгоритмы обработки гетеродинного сигнала ветрового лидарного профилометра системы метеобеспечения авиационной безопасности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология»

### **1. Актуальность работы.**

Информация о ветровых характеристиках атмосферы необходима в самых различных сферах жизнедеятельности человека. В настоящее время для определения различных параметров ветра, среди которых основными являются скорость и направление, применяются дистанционные методы зондирования атмосферы, развитие которых привело к созданию и широкому использованию активных дальномеров оптического диапазона (лидаров). Лидарный мониторинг ветровой обстановки применяется для обеспечения безопасности в авиации, в ветроэнергетике и других областях. Среди используемых в настоящее время лидаров наиболее перспективными являются устройства, в основе работы которых лежит эффект Доплера.

Важной тенденцией развития методов и средств доплеровского лидарного мониторинга является стремление к их полной автоматизации, повышению оперативности и надежности получаемой измерительной информации. Вследствие этого возникают требования к разработке математической модели лидара и эффективности алгоритмов и программ обработки сигналов, высокой точности в достаточно большом диапазоне измеряемых или контролируемых величин, высокой метрологической достоверности получаемых результатов.

В рассматриваемой диссертационной работе решаются задачи выбора математической модели локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием и разработки алгоритмов обработки сигналов, что и определяет безусловную актуальность проведенной работы.

### **2. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Обоснованность результатов, полученных в рецензируемой диссертационной работе, определяется, в целом, использованием современного математического аппарата, привлечением для анализа адекватных физических моделей рассматриваемых процессов, проведением численных оценок, сравнение которых с данными, известными из литературы, характеризует их как вполне реальные и соответствующие устоявшимся критериям.

Следует считать вполне обоснованной созданную математическую модель работы локационного сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа с коническим сканированием.

Вполне обоснованным представляется, использование метода наименьших квадратов при решении переопределенной системы уравнений, получаемой при анализе непрерывного вращения лазерного луча по углу азимута и отборе его дискретных положений.

В работе проведены тщательные экспериментальные исследования, в которых разработанные в диссертации методы и алгоритмы использовались для обработки сигналов ветрового лидарного профилометра ПЛВ-300, разработанного в НПП «Лазерные системы». Было проведено сравнение результатов синхронных измерений скорости и направления ветра с помощью ПЛВ-300 и измерительного комплекса ВММ-310 ФГБУ «НПО «Тайфун», использовавшегося в качестве образцового. Полученные расхождения в результатах 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, что подтверждает достоверность полученных в работе результатов. Следует отметить чрезвычайно большой объем проведенных экспериментальных исследований, направленных, в том числе, на проверку предложенных и разработанных в диссертации методов.

### **3. Степень новизны результатов, полученных автором диссертации.**

Новизна полученных в диссертационной работе результатов определяется, прежде всего, новым подходом к обработке осредненного спектра сигнала ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа. В работе предлагается и используется метод деления разрядной сетки для одновременного удаления полезного доплеровского сигнала и подавления аддитивного шума в скользящем режиме в окне произвольного, то есть как четного, так и нечетного размера. Данный метод позволяет осуществить вместо последовательных операций обработки сигнала их параллельную реализацию и тем самым обеспечивает повышение быстродействия алгоритма на время, требуемое для подавления отдельно импульсных помех, либо аддитивных шумов.

Среди новых результатов, полученных в диссертации, следует отметить использование разработанных методов и алгоритмов для проведения в районе аэропорта Пулково измерения вихревого следа самолета Боинг 737-800 с помощью отечественного когерентного доплеровского лидарного профилометра импульсного типа ПЛВ-2000.

### **4. Оценка научной и практической ценности, реализация результатов работы.**

Научная ценность рассматриваемой диссертации состоит в основном в последовательном исследовании методов и алгоритмов обработки сигнала когерентного доплеровского лидарного профилометра непрерывного типа. Полученные результаты являются важным вкладом в методологию разработки систем лидарного мониторинга ветровой обстановки.

Практическая ценность работы состоит, прежде всего, в том, что развитые в диссертации методы и алгоритмы могут быть использованы и уже используются при построении когерентных доплеровских лидарных профилометров.

Следует отметить, что материалы, полученные при измерении вихревого следа самолета Боинг 737-800, 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.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Приведенное в первой главе диссертации в разделе «Физические основы измерения ветровых характеристик атмосферы лидарными профилометрами» подробное описание достаточно хорошо всем известного эффекта Доплера представляется не слишком уместным, в то время как анализ работы доплеровского лидара и особенности его функционирования в непрерывном и импульсных режимах в диссертации практически отсутствуют.
2. При описании принципа конического сканирования автор не делает никаких ссылок на литературу. Это замечание можно распространить на всю работу – некоторые элементарные вещи подробно описываются, например характеристики гауссова пучка, а важные для данной работы особенности работы лидаров или отсутствуют вовсе или даются без ссылок на литературу.
3. При описании методов, используемых для нахождения максимума спектра сигнала, автор не совсем правильно интерпретирует метод нахождения центра тяжести, говоря, что при использовании этого метода предполагается, что координата максимума полезного доплеровского спектра совпадает с координатой его центра тяжести. На самом деле в этом методе максимум не ищется – ищется только центр тяжести, лучше, чем максимум, характеризующий среднее значение.
4. Утверждение автора, что «Метод гауссовской аппроксимации обеспечивает более высокую точность по сравнению с центроидным методом и методом с использованием кубического сплайна», ничем в работе не подтверждено и является голословным.
5. В таблице 4.1 – «Технические характеристики ветрового когерентного лидарного профилометра ПЛВ-300» приводится погрешность измерения скорости ветра, равная  $\pm 0,1$  м/с. В таблице 4.2 – «Сравнение результатов измерений ПЛВ-300 и ВММ-310» указывается расхождение результатов измерений, равное 0,23 м/с. Тем не менее, сертификационные требования по погрешностям измерений ( $\pm 10$  % по скорости) оказываются выполненными.
6. В тексте диссертации присутствуют некоторые неточности, например: В выражении (3.1)  $\sigma$  характеризуется как дисперсия гауссовского распределения, хотя на самом деле это СКО.

