

Алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей в задаче измерения скорости ветра

П.А. Филимонов¹, М.Л. Белов¹, С.Е. Иванов¹, В.А. Городничев¹, Ю.В. Федотов¹

¹МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

Разработан алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей для обработки изображений в задаче лидарного измерения скорости ветра в атмосфере. Проверка разработанного алгоритма производилась с использованием синтезированных лидарных сигналов и на данных натуральных измерений. Алгоритм обработки аэрозольных полей в координатах «дальность – время» позволяет существенно уменьшить погрешности лидарного времяпролётного метода измерения скорости ветра по сравнению с корреляционными методами измерения.

Ключевые слова: цифровая обработка оптических сигналов, цифровая обработка изображений, лидар, алгоритмы.

Цитирование: Филимонов, П.А. Алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей в задаче измерения скорости ветра / П.А. Филимонов, М.Л. Белов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев, Ю.В. Федотов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 791-796. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-708.

Citation: Filimonov PA, Belov ML, Ivanov SE, Gorodnichev VA, Fedotov YV. An algorithm for measuring wind speed based on sampling aerosol inhomogeneities. Computer Optics 2020; 44(5): 791-796. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-708.

Введение

На данный момент существует ряд важных практических приложений дистанционного и оперативного мониторинга скорости атмосферного ветра: метеорологическое обеспечение взлёта и посадки летательных аппаратов, мониторинг ветровой обстановки, контроль аэрозольных загрязнений, научные исследования аэрозольных полей и увеличение эффективности работы ветрогенераторов. Каждая из них предъявляет высокие требования к точности и быстродействию измерений. Необходимым требованиям удовлетворяют оптические методы измерения, в частности лидарные. Большинство лидарных методов измерения скорости и направления ветра основаны на зондировании атмосферного аэрозоля, который полностью увлекается воздушными потоками [1–9].

Лидарные методы для задач измерения скорости ветра можно условно поделить на две группы: доплеровские и времяпролётные [4]. Наиболее распространённым является доплеровский метод, позволяющий определять с высокой точностью скорость и направление ветра. Его недостатками являются большое время обновления данных и необходимость пространственного осреднения с использованием конического сканирования атмосферы по азимуту с большим углом места, а значит, и невозможность работы в условиях сложного рельефа местности [7].

Времяпролётные методы измерений включают ряд следующих: корреляционный, структурный и трассерная визуализация потоков. Их преимуществами по сравнению с доплеровскими являются большое быстродействие за счет отсутствия необходимости пространственного сканирования атмосферы и меньшая себестоимость приборов. Однако по сравнению с до-

плеровскими методами они обладают худшей точностью измерений скорости ветра, поэтому перспективно развитие времяпролётных методов с целью увеличения точности измерений.

Одним из направлений улучшения качества времяпролётных методов является улучшение методов обработки лидарных сигналов и изображений. Лидарный сигнал существенно зависит от состояния атмосферы и является нестационарным по дальности зондирования и времени измерения. Получение полезной информации из такого сигнала для определения скорости и направления ветра с приемлемой точностью будет сильно зависеть от качества методов цифровой обработки. Для решения задачи выделения полезного сигнала в таких случаях подходят алгоритмы с адаптивной фильтрацией, вейвлет-обработка и др. Отметим, что наиболее перспективным методом обработки является использование нейронных сетей, которые при наличии достаточного количества данных показывают наилучшие результаты по сравнению с классическими методами цифровой обработки [10–14].

Статья посвящена разработке алгоритма обработки изображений в координатах «дальность – время» для задачи измерения скорости и направления ветра на основе времяпролётного метода и апробации разработанного алгоритма на синтезированных и экспериментально полученных аэрозольных полях.

Математическая модель лидарного сигнала и перемещения аэрозольных неоднородностей под действием ветра

Времяпролётные методы измерения основаны на регистрации перемещения аэрозольных частиц и аэрозольных неоднородностей атмосферы – допускается, что аэрозольные частицы полностью увлекают-

ся ветром и их скорость совпадает со скоростью ветра. В приземном слое атмосферы время жизни аэрозольных неоднородностей составляет от единиц до десятков секунд, а их размеры – от одного метра до десяти метров и более, причем с увеличением высоты над земной поверхностью размер неоднородностей увеличивается. При дальнейшем рассмотрении неоднородностей принимаются следующие типовые допущения: неоднородности изотропны и время их жизни больше времени измерения. При лазерном зондировании для измерения скорости и направления ветра используют коэффициент обратного аэрозольного рассеяния, в вариациях величины которого проявляются неоднородности [9].

При наличии ветра неоднородность перемещается в пространстве, и её перенос \bar{r}_i за время измерения Δt можно оценить через среднюю за время измерения скорость ветра \bar{V} :

$$\bar{r}_i = \bar{V} \Delta t.$$

Для моностатической схемы измерения среднюю за время измерения скорость ветра можно представить в виде (рис. 1):

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\parallel} &= \bar{V} \cos \alpha, \\ \bar{V}_{\perp} &= \bar{V} \sin \alpha, \end{aligned}$$

где α – угол между направлением зондирования (оптической осью лидара) и направлением атмосферного ветра, \bar{V}_{\parallel} , \bar{V}_{\perp} – продольная и поперечная (относительно направления зондирования) компоненты скорости ветра.

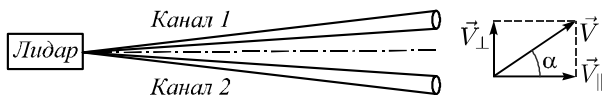


Рис. 1. Схема измерения скорости ветра

Аналогично можно представить перенос аэрозольной неоднородности:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{\parallel} &= \bar{r} \cos \alpha, \\ \bar{r}_{\perp} &= \bar{r} \sin \alpha. \end{aligned}$$

где \bar{r}_{\parallel} , \bar{r}_{\perp} – перенос неоднородности в продольном и поперечном (относительно направления зондирования) направлении.

Регистрируемый лидарный сигнал в общем случае имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} U(z) &= K(P(z)) \cdot P(z) \approx K \cdot P(z), \\ P(z) &= \frac{1}{z^2} A(z)\beta(z)T(z), \end{aligned}$$

где z – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы, K – передаточная функция электронного тракта, $P(z)$ – мощность обратно рассеянного сигнала, $A(z)$ – аппаратная функция лидара, $T(z)$ – коэффициент пропускания атмосферы, $\beta(z)$ – коэффициент обратного рассеяния атмосферы.

Аэрозольные неоднородности проявляются в виде флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния. В соответствии с этим можно записать:

$$\beta(z) = \bar{\beta}(z) + \tilde{\beta}(z),$$

где $\bar{\beta}(z)$, $\tilde{\beta}(z)$ – средняя по ансамблю реализаций и флуктуационная компоненты соответственно.

Регистрируемый лидарный сигнал без предварительной калибровки не позволяет найти абсолютную величину $\tilde{\beta}(z)$, но позволяет определить относительные флуктуации коэффициента обратного рассеяния:

$$\Delta_i^{\beta} = \frac{\tilde{\beta}}{\bar{\beta}} = \frac{P_i(z) - \bar{P}(z)}{\bar{P}(z)} \approx \frac{U_i(z) - \bar{U}(z)}{\bar{U}(z)},$$

где $P_i(z)$, $U_i(z)$ – регистрируемая мощность и сигнал реализации в момент времени t_i , $\bar{P}(z)$, $\bar{U}(z)$ – усреднённый по ансамблю реализаций профиль мощности и регистрируемого сигнала.

Каждая из регистрируемых реализаций в момент времени t_i , $i=1..N$ позволяет получить относительный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния $\Delta_i^{\beta}(z)$, а последовательность таких реализаций за время измерения Δt формирует поле относительных флуктуаций аэрозольных неоднородностей Δ_{ij}^{β} , $j=1..M$, где M – размер регистрируемой реализации. Полученное поле Δ^{β} в координатах «дальность – время» содержит информацию о переносе неоднородностей и позволяет измерить продольную и поперечную компоненту скорости ветра. При обработке поля Δ^{β} можно рассматривать как изображение с целью применения методов цифровой фильтрации, основанных на локальных характеристиках. Обработка сигналов и анализ неоднородностей производится при допущении, что в локальной области характеристики сигнала можно считать стационарными по дальности и времени. Основные этапы измерения скорости ветра представлены на рис. 2.

Этап формирования поля флуктуаций Δ^{β} тестировался предварительно на синтезированных данных, а затем с использованием данных натуральных измерений. Синтезированные данные формировались с использованием метода формирующего фильтра [15].

При моделировании использовались 20 вариантов пространственных полей флуктуаций с известной корреляционной характеристикой размером 300×300 м. Для моделирования были использованы скорости ветра от 0 до 15 м/с с шагом 0,1 м/с с различными направлениями относительно лазерного луча. Ширина корреляционной функции составляла величины от 0,5 до 10 м с шагом 0,5 м. При моделировании эхо-сигнала добавлялась флуктуация мощности лазерного импульса с СКО 1% и белый шум, моделирующий нестационарность сигнала по дальности. Пример смоделированного поля в координатах «дальность – время» представлен на рис. 3, где «дальность» – дальность от лидара до объема атмосферы, а «время» – время измерения.

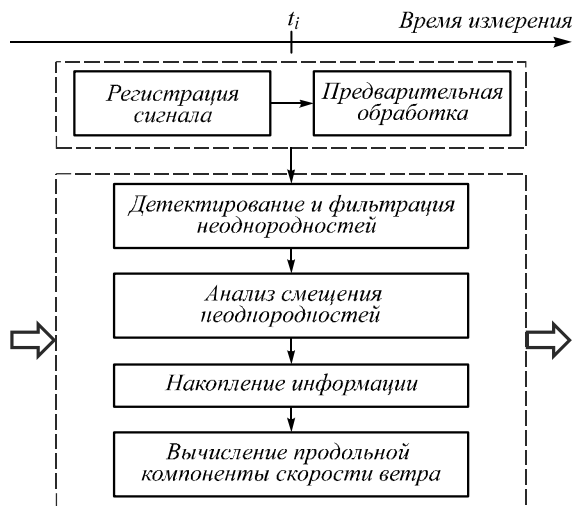


Рис. 2. Основные этапы вычисления продольной компоненты скорости ветра

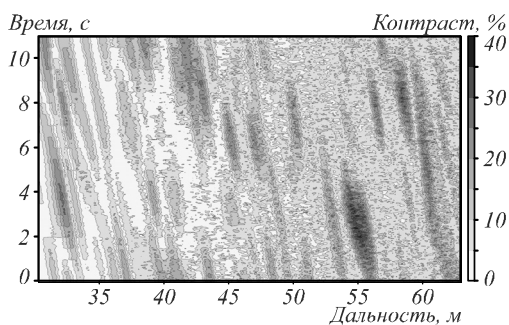


Рис. 3. Пример синтезированного поля аэрозольных неоднородностей: $V^\perp = 2,0$ м/с, $V^\parallel = -3,0$ м/с

Натурные данные измерений получены с использованием лидара [16]. Пример поля неоднородностей Δ^β в координатах «дальность – время», полученного из натуральных данных, представлен на рис. 4.

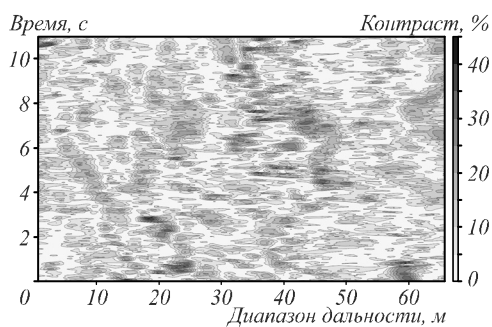


Рис. 4. Пример поля аэрозольных неоднородностей: $V^\perp = 2,3$ м/с, $V^\parallel = 1,0$ м/с

Цель блока детектирования и фильтрации неоднородностей – выделение на изображении наиболее контрастных неоднородностей. В качестве алгоритма выделения неоднородностей использовался алгоритм сегментации [16]. Пример выделения наиболее контрастных неоднородностей представлен на рис. 5.

Алгоритм измерения скорости ветра

Задача измерения скорости ветра с использованием предложенной схемы измерения состоит из двух

подзадач – измерения продольной и поперечной относительно направления зондирования компонент скорости ветра.

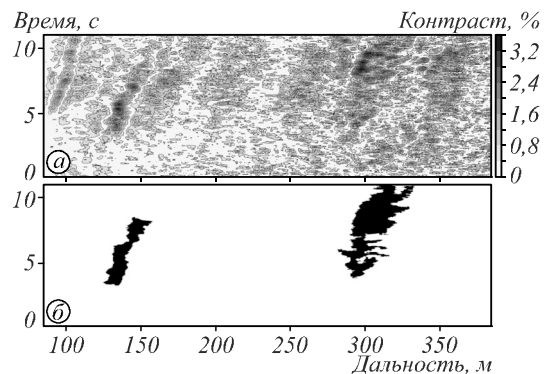


Рис. 5. Результат применения алгоритма сегментации аэрозольных неоднородностей: поле после предварительной обработки (а); поле после блока детектирования и фильтрации неоднородностей (б)

Наиболее простой схемой измерения одновременно и продольной, и поперечной скорости ветра является двухлучевая схема (рис. 1). Измерение скорости ветра происходит на основе анализа взаимного смещения неоднородностей в канале 1 и канале 2 (в блоке анализа смещения неоднородностей на рис. 2).

Исходными данными для работы блока анализа смещения неоднородностей являются поля флуктуаций Δ^β в координатах «дальность – время», зарегистрированные в канале 1 и 2 (рис. 6).

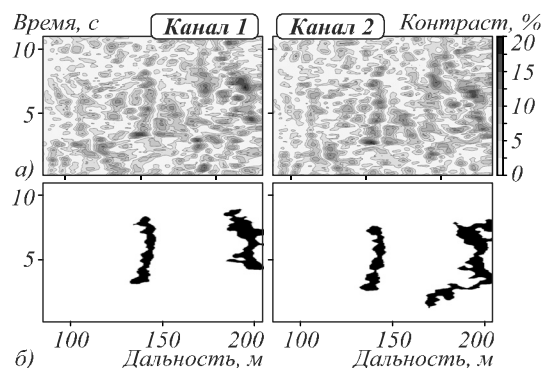


Рис. 6. Результат применения алгоритма сегментации аэрозольных неоднородностей для двух каналов: поле после предварительной обработки (а); поле после блока детектирования и фильтрации неоднородностей (б)

Рассмотрим процесс перемещения аэрозольных неоднородностей в продольном направлении. В течение времени измерения неоднородность переносится через лидарный луч под действием ветра, и регистрируемый лидарный сигнал $P_i(z)$ содержит профиль перемещающихся неоднородностей. При регистрации сигнала можно считать, что центру неоднородности соответствует максимальное значение флуктуации в реализации Δ_i^β , то есть пик в локальном срезе сигнала. Таким образом, регистрация последовательности пиков Δ_i^β фиксирует положение каждой из неоднородностей в момент времени t_i , а значит, содержит информацию о

перемещении в продольном направлении. Существует ряд подходов к детектированию пиков в сигнале, таких как использование корреляционного анализа, цифровой фильтрации, пороговой обработки сигнала и распознавание образов [13, 17]. В предложенном алгоритме используется алгоритм детектирования пиков на основе вейвлет-преобразования сигналов [18].

Представим осреднённую за время и диапазон дальности измерения продольную компоненту скорости ветра как среднюю скорость перемещения аэрозольных неоднородностей:

$$\bar{V}_{\parallel} = \frac{1}{K} \sum_k V_k^{\parallel},$$

где K – общее число неоднородностей, V_k^{\parallel} – продольная скорость перемещения неоднородности:

$$V_k^{\parallel} = \frac{\Delta r_k}{\Delta t},$$

где Δr_k – перенос неоднородности между начальным и конечным моментом измерения.

Множество факторов, влияющих на точность измерений: турбулентность, шумы электронного тракта, джиттер лазерного импульса – ухудшают качество проводимых измерений. Чтобы использовать накопленную информацию о перемещении и получить осреднённый устойчивый результат, воспользуемся функционалом для средней ошибки перемещения неоднородностей:

$$F(V^{\parallel}) = \frac{1}{K} \sum_k f_k(V^{\parallel}), \tag{1}$$

где $f_k(V^{\parallel})$ – функция ошибки определения скорости ветра для неоднородности k , K – количество неоднородностей. Минимизация функционала $F(V^{\parallel})$ позволяет определить продольную компоненту скорости:

$$\hat{V}^{\parallel} = \arg \min_{V^{\parallel} \in \mathbb{R}} F(V^{\parallel}),$$

где \hat{V}^{\parallel} – полученное значение скорости ветра.

При нахождении значения продольной компоненты скорости ветра вид функции ошибки для каждой из неоднородностей может учитывать структуру самой неоднородности и включать более детальную информацию о накопленных данных. В простейшей версии алгоритма реализована неравномерность отношения сигнал/шум для пика неоднородности во время измерения. Запишем для каждой неоднородности функцию ошибки с учётом сэмплирования пиковых значений коэффициента флуктуаций (рис. 7):

$$f_k(V^{\parallel}) = \sum_s w_s^k (V^{\parallel} t_s - r_s)^2,$$

где s – номер сэмпла для неоднородности, w_s^k – вес для каждого сэмпла, r_s – положение координаты неоднородности в момент времени t_s . Веса для каждой

компоненты в функции ошибки прямо пропорциональны от максимальной амплитуды флуктуаций в сэмпле и нормировались на L2-норму:

$$\|w\|_2 = \sqrt{\sum_k \sum_s (w_s^k)^2}.$$

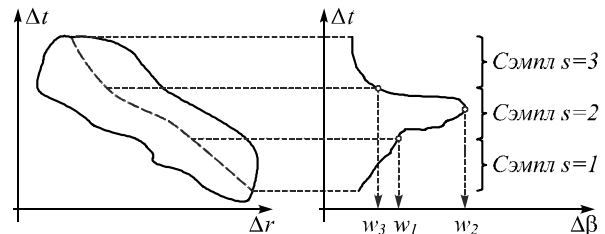


Рис. 7. Сэмплирование неоднородности для формирования функционала

В отличие от продольной компоненты, измерение поперечной компоненты скорости ветра является более сложной задачей. Классическим решением является сканирование в секторе пространства [11]. Однако без сканирования также возможно измерение поперечной относительно луча скорости ветра: использование двух и более лучевых схем, переключение одного луча в малом угле [5].

Рассмотрим двухлучевую схему измерения, когда лучи находятся под малым углом γ друг к другу. Поле неоднородностей, полученное для одного луча, позволяет оценить поперечную компоненту по абсолютному значению без учета направления относительно луча [19]. Большая точность может быть получена посредством анализа полей неоднородностей в двух лучах. При этом возможны 2 сценария детектирования неоднородности во время измерения: неоднородность зарегистрирована в одном луче, но не зарегистрирована в другом, и неоднородность зарегистрирована в обоих лучах.

При наличии неоднородности в обоих лучах необходимо установить соответствие для всей области проявления неоднородности. В режиме реального времени при обнаружении неоднородности в одном из лучей сопоставление её более надёжно в случае прогнозирования движения и ожидаемого положения в другом луче, при этом качество детектирования будет зависеть от величины продольной и поперечной компоненты скорости ветра (рис. 8). Для прогнозирования могут быть использованы, например, регрессионные модели или алгоритмы экстраполяции [13, 17].

Допуская, что расстояние между лучами в локальной области одинаковое, в первом сценарии для V_k^{\perp} можно наложить условие:

$$V_k^{\perp} < \frac{b(z)}{\Delta t},$$

где $b(z)$ – расстояние между лучами на дальности z , где была зарегистрирована неоднородность. Для определения поперечной скорости ветра воспользуемся функционалом, аналогичным (1):

$$F(V^\perp) = \frac{1}{K} \sum_K f_k(V^\perp),$$

$$f_k(V^\perp) = \sum_s w_s (x_2 - (b(z) + V^\perp \tau_s)),$$

где s – номер сэмпла при разбиении, w_s – весовой коэффициент, x_2 – положение неоднородности во 2-м луче, τ_s – разница по времени для одной области неоднородности в разных лучах.

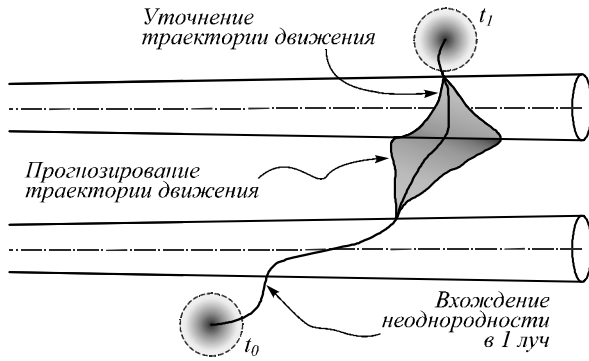


Рис. 8. Определение поперечной компоненты скорости ветра

Для ускорения сходимости функционала можно воспользоваться оценкой компонент скорости ветра на основе размеров связанной области:

$$V_{start}^\parallel = \frac{1}{K} \sum_k \tilde{V}_k^\parallel,$$

$$V_{start}^\perp = \frac{1}{K} \sum_k \tilde{V}_k^\perp,$$

где $\tilde{V}_k^\parallel, \tilde{V}_k^\perp$ – оценка продольной и поперечной скорости ветра с помощью алгоритма [19] для неоднородности k , знак поперечной скорости определялся номером канала, в котором проявлялась неоднородность.

Объединим измерение продольной и поперечной компоненты. Для заданного времени измерения Δt , количества зарегистрированных реализаций сигнала N и заданной дальности зондирования, определяемого количеством отсчетов сигнала M , получены срезы поля неоднородностей в каждом из каналов $\Delta^{\beta 1}$ и $\Delta^{\beta 2}$, дополнительно к ним применен алгоритм сегментации неоднородностей:

- 1) для $\Delta_i^{\beta 1}$ и $\Delta_i^{\beta 2}$ вычислить положение и значение амплитуды пиков для каждой неоднородности;
- 2) установить соответствие неоднородностей между полями для разных каналов;
- 3) сформировать компоненты ошибки для продольной компоненты;
- 4) сформировать компоненты ошибки для измерения поперечной компоненты, если неоднородность принадлежит множеству $\{K^\perp\}$ неоднородностей, зарегистрированных в 2 лучах;
- 5) вычислить стартовое значение параметров;
- 6) оптимизировать функционал.

В соответствии с этим можно записать:

```

for i=1...N:
  for k=1...K:
    [pos, amplitude]i,k ← find_peaks(Δiβ)
    fk(V||) ← build_parallel_error(Δβ, s, k)
    F(V||, V⊥) ← F(V||, V⊥) + fk(V||)
    Vstart|| ← (Vstart|| + V̂k||) / 2
  if k ∈ {K⊥}:
    fk(V⊥) ← build_trans_error(Δβ, s, k)
    F(V||, V⊥) ← F(V||, V⊥) + fk(V⊥)
    Vstart⊥ ← (Vstart⊥ + V̂k⊥) / 2
V̂||, V̂⊥ ← argmin F(V||, V⊥)
    
```

Для анализа работы предложенного алгоритма проведено математическое моделирование с использованием синтезированных полей в координатах «дальность – время» и получены результаты обработки данных натуральных измерений. Для сравнения выбраны классический корреляционный алгоритм измерения [9], корреляционный метод с сегментацией неоднородностей [15] и разработанный алгоритм на основе сэмплирования. При сравнении оценивалась средняя абсолютная погрешность (по отношению к показаниям анеморумбометра) для определения продольной компоненты ΔV^\parallel , поперечной компоненты ΔV^\perp . Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение результатов измерения

	Корр. алг.	Сегментация + корр. алг.	Сегментация + алгоритм сэмпл.
Синтезированные данные			
ΔV^\parallel , м/с	0,23	0,19	0,10
ΔV^\perp , м/с	0,37	0,33	0,26
Натурные данные			
ΔV^\parallel , м/с	0,38	0,30	0,15
ΔV^\perp , м/с	0,60	0,47	0,33

Заключение

Разработан алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей для обработки изображений в задаче измерения скорости ветра для лидарного зондирования атмосферы. Разработанный алгоритм протестирован на синтетических данных, полученных с различными корреляционными характеристиками, и натуральных данных измерений. Показано, что алгоритм обработки аэрозольных полей в координатах «дальность – время» позволяет существенно уменьшить погрешности лидарного времяпролётного метода измерения скорости ветра по сравнению с корреляционными методами измерения.

Литература

1. **Annoni, J.** Analysis of control-oriented wake modeling tools using lidar field results / J. Annoni, P. Fleming, A. Scholbrock, J. Roadman, S. Dana, C. Adcock, F. Porte-Agel, S. Raach, F. Haizmann, D. Schlipf // Wind Energy Science. – 2018. – Vol. 3, Issue 2. – P. 819-831. – DOI: 10.5194/wes-3-819-2018.

2. **Zhan, L.** LiDAR measurements for an onshore wind farm: Wake variability for different incoming wind speeds and atmospheric stability regimes / L. Zhan, S. Letizia, G.V. Iungo // *Wind Energy*. – 2020. – Vol. 23, Issue 3. P. 501-527. – DOI: 10.1002/we.2430.
3. **Kim, M.-H.** The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / M.-H. Kim, A.H. Omar, J.L. Tackett, M.A. Vaughan, D.M. Winker, C.R. Trepte, Y. Hu, Z. Liu, L.R. Poole, M.C. Pitts, J. Kar, B.E. Magill // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11, Issue 11. – P. 6107-6135. – DOI: 10.5194/amt-11-6107-2018.
4. **Kovalev, V.A.** Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods / V.A. Kovalev, W.E. Eichinger. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 615 p. – ISBN: 0-471-20171-5.
5. **Prasad, N.S.** Three-beam aerosol backscatter correlation lidar for wind profiling / N.S. Prasad, A.R. Mylapore // *Optical Engineering*. – 2017. – Vol. 56, Issue 3. – 031222. – DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031222.
6. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
7. **Suomi, I.** Methodology for obtaining wind gusts using Doppler lidar / I. Suomi, S.-E. Gryning, E.J. O'Connor, T. Vihma // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2017. – Vol. 143. – P. 2061-2072. – DOI: 10.1002/qj.3059.
8. **Stull, R.** Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science (version 1.02b) / R. Stull. – University of British Columbia, 2017. – 940 p. – ISBN: 978-0-88865-283-6.
9. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. – Новосибирск: Наука, 1985. – 223 с.
10. **Кропотов, Ю.А.** Метод прогнозирования изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах / Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков, А.А. Белов // *Компьютерная оптика* – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 1093-1100. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1093-1100.
11. **Dérian, P.** Wavelet-based optical flow for two-component wind field estimation from single aerosol lidar data / P. Dérian, C.F. Mauzey, S.D. Mayor // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2015. – Vol. 32, Issue 10. – P. 1759-1778. – DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0010.1.
12. **Proakis, J.G.** Digital signal processing / J.G. Proakis, D.K. Manolakis. – 4th ed. – Prentice Hall, 2006. – 1104 p. – ISBN: 978-0-13-187374-2.
13. **Bishop, C.M.** Pattern recognition and machine learning / C.M. Bishop. – Singapore: Springer, 2006. – 738 p. – ISBN: 978-0-387-31073-2.
14. **Агафонова, Ю.Д.** Эффективность алгоритмов машинного обучения и свёрточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитно-резонансных томограммах головного мозга / Ю.Д. Агафонова, А.В. Гайдель, П.М. Зельтер, А.В. Капишников // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 266-273. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-671.
15. **Бакалов, В.П.** Цифровое моделирование случайных процессов. – М.: Изд-во Сайнс-пресс. – 2002. – 88 с. – ISBN: 5-94818-006-9.
16. **Филимонов, П.А.** Алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей / П.А. Филимонов, М.Л. Белов, Ю.В. Федотов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 1062-1067. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1062-1067.
17. **Hastie, T.** The elements of statistical learning / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – New York: Springer, 2001. – 745 p.
18. **Du, P.** Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching / P. Du, W.A. Kibbe, S.M. Lin // *Bioinformatics*. – 2006(07). – Vol. 22, Issue 17. – P. 2059-2065. – DOI: 10.1093/bioinformatics/btl355.
19. Белов, М.Л. Лазерный дистанционный метод измерения порывов атмосферного ветра / М.Л. Белов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков // *Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение»*. – 2014. – № 2. – С. 40-52.

Сведения об авторах

Филимонов Павел Анатольевич, 1991 года рождения, в 2014 году окончил МГТУ им. Баумана по специальности 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии», работает преподавателем в МГТУ им. Н.Э. Баумана и инженером-разработчиком в Samsung RnD Russia. Область научных интересов: лазерное дистанционное зондирование, цифровая обработка сигналов и изображений, машинное обучение. E-mail: paulinio91@yandex.ru.

Белов Михаил Леонидович, 1950 года рождения, в 1973 году окончил Московский энергетический институт, работает ведущим научным сотрудником НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: атмосферная оптика, лазерная локация, флуоресценция, газоанализ. E-mail: belov@bmstu.ru.

Иванов Сергей Евгеньевич, 1982 года рождения, в 2007 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана. Область научных интересов: лазерное зондирование, лазерная локация. E-mail: ivanov_sergey2@mail.ru.

Городничев Виктор Александрович, 1952 года рождения, в 1976 году окончил МГУ им. М.В. Ломоносова, работает начальником отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: атмосферная оптика, лазерная локация, газоанализ. E-mail: gorod@bmstu.ru.

Федотов Юрий Викторович, 1974 года рождения, в 1998 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, работает научным сотрудником НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов и изображений, атмосферная оптика, лазерная локация, флуоресценция, газоанализ. E-mail: fed@bmstu.ru.

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 28 февраля 2020 г. Окончательный вариант – 20 мая 2020 г.

An algorithm for measuring wind speed based on sampling aerosol inhomogeneities

P.A. Filimonov¹, M.L. Belov¹, S.E. Ivanov¹, V.A. Gorodnichev¹, Yu.V. Fedotov¹

¹ Research institute of radioelectronics and laser technologies of Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract

A digital image processing algorithm based on sampling aerosol inhomogeneities was developed in the applied problem of laser remote sensing for measuring the velocity of wind. Tests of the developed algorithm were conducted for synthetic data from numerical simulations and data measured by a lidar. The algorithm developed performs processing of the field of aerosol backscattering coefficient in "Range-Time" coordinates and sufficiently increases the measurement accuracy in comparison with correlation methods.

Keywords: discrete optical signal processing, digital image processing, lidar, algorithms.

Citation: Filimonov PA, Belov ML, Ivanov SE, Gorodnichev VA, Fedotov YV. An algorithm for measuring wind speed based on sampling aerosol inhomogeneities. *Computer Optics* 2020; 44(5): 791-796. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-708.

References

- [1] Annoni J, Fleming P, Scholbrock A, Roadman J, Dana S, Adcock C, Porte-Agel F, Raach S, Haizmann F, Schlipf D. Analysis of control-oriented wake modeling tools using lidar field results. *Wind Energy Sci* 2018; 3(2): 819-831. DOI: 10.5194/wes-3-819-2018.
- [2] Zhan L, Letizia S, Iungo GV. LiDAR measurements for an onshore wind farm: Wake variability for different incoming wind speeds and atmospheric stability regimes. *Wind Energy* 2020; 23(3): 501-527. DOI: 10.1002/we.2430.
- [3] Kim MH, Omar AH, Tackett JL, Vaughan MA, Winker DM, Trepte CR, Hu Y, Liu Z, Poole LR, Pitts MC, Kar J, Magill BE. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm. *Atmos Meas Tech* 2018; 11(11): 6107-6135. DOI: 10.5194/amt-11-6107-2018.
- [4] Kovalev VA, Eichinger WE. *Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc; 2004. ISBN: 0-471-20171-5.
- [5] Prasad NS, Mylapore AR. Three-beam aerosol backscatter correlation lidar for wind profiling. *Opt Eng* 2017; 56(3): 031222. DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031222.
- [6] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: review. *Computer Optics* 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [7] Suomi I, Gryning SE, O'Connor EJ, Vihma T. Methodology for obtaining wind gusts using Doppler lidar. *Q J R Meteorol Soc* 2017; 143: 2061-2072. DOI: 10.1002/qj.3059.
- [8] Stull R. *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science (version 1.02b)*. University of British Columbia; 2017. ISBN: 978-0-88865-283-6.
- [9] Matvienko GG, Zade GO, Ferdinandov ES, Kolev IN, Avramova RP. Laser remote sensing correlation methods for measurement of wind velocity [In Russian]. Novosibirsk: "Science" Publisher; 1985.
- [10] Kropotov YA, Proskuryakov AY, Belov AA. Method for forecasting changes in time series parameters in digital information management systems. *Computer Optics* 2018; 42(6): 1093-1100. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1093-1100.
- [11] Dérian P, Mauzey CF, Mayor SD. Wavelet-based optical flow for two-component wind field estimation from single aerosol lidar data. *J Atmos Oceanic Technol* 2015; 32(10): 1759-1778. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0010.1.
- [12] Proakis JG, Manolakis DK. *Digital signal processing*. 4th ed. Prentice Hall; 2006. ISBN: 978-0-13-187374-2.
- [13] Bishop CM. *Pattern recognition and machine learning*. Singapore: Springer; 2006. ISBN: 978-0-387-31073-2.
- [14] Agafonova JD, Gaidela AV, Zelter PM, Kapishnikov AV. Efficiency of machine learning algorithms and convolutional neural network for detection of pathological changes in MR images of the brain. *Computer Optics* 2020; 44(2): 266-273. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-671.
- [15] Bakalov VP. *Digital modeling of random processes* [In Russian]. Moscow: "Science-Press" Publisher; 2002. ISBN: 5-94818-006-9.
- [16] Filimonov PA, Belov ML, Fedotov YV, Ivanov SE, Gorodnichev VA. An algorithm for segmentation of aerosol inhomogeneities. *Computer Optics* 2018; 42(6): 1062-1067. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1062-1067.
- [17] Hastie T, Friedman J. *The elements of statistical learning*. New York: Springer; 2001.
- [18] Du P, Kibbe WA, Lin SM. Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching. *Bioinformatics* 2006; 22(17): 2059-2065. DOI: 10.1093/bioinformatics/btl355.
- [19] Belov ML, Ivanov SE, Gorodnichev VA, Strelkov BV. Laser remote method for measuring gusts of atmospheric wind [In Russian]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Instrument Engineering* 2014; 2(95): 40-52.

Authors' information

Pavel Anatolyevich Filimonov (b. 1991) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2014, majoring in Laser Technics and Laser Technologies. Currently he works as lecturer in Bauman Moscow State Technical

University and engineer in Samsung Research Russia. Research interests are laser remote sensing, digital signal and image processing, machine learning. E-mail: paulinio91@yandex.ru.

Mikhail Leonidovich Belov (b. 1950) graduated from Moscow Energy Institute in 1973. He works as the lead science researcher at the Bauman Moscow State Technical University. His research interests are currently focused on atmosphere optics, laser remote sensing, fluorescence and gas analysis. E-mail: belov@bmstu.ru.

Sergey Evgenievich Ivanov (b. 1982) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. He works as the science researcher at the Bauman Moscow State Technical University. His research interests are: laser remote sensing, digital image processing. E-mail: ivanov_sergey2@mail.ru.

Victor Alexandrovich Gorodnichev (b. 1952) graduated from Moscow State Institute in 1976. He works as the department manager in Bauman Moscow State Technical University Research Institute of Radioelectronics and Laser Techniques. His research interests are currently focused on atmosphere optics, laser remote sensing and gas analysis. E-mail: gorod@bmstu.ru.

Yury Victorovich Fedotov (b. 1952) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1998. He works as the science researcher at the Bauman Moscow State Technical University. His research interests are currently focused on digital signal and image processing, atmosphere optics, laser remote sensing, fluorescence and gas analysis. E-mail: fed@bmstu.ru.

Received February 28, 2020. The final version – May 20, 2020.
