

АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

П.А. Филимонов¹, М.Л. Белов², Ю.В. Федотов², С.Е. Иванов², В.А. Городничев²

¹Аспирантура МГТУ им. Баумана, Москва, Россия,

²НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

Разработан алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей атмосферы на поле относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, регистрируемого в координатах «Дальность – Время», на основе скользящего окна двумерной корреляционной функции. Полученный алгоритм позволяет надёжно выделять неоднородности, что может быть использовано в практических целях для исследования аэрозольного поля атмосферы и увеличения точности измерения скорости и направления ветра. Показано применение разработанного алгоритма для получения гистограммы распределения размеров аэрозольных неоднородностей из данных лидарного зондирования упругого рассеяния в приземном слое атмосферы на длине волны 355 нм.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, лидар, аэрозольные неоднородности, приземный слой атмосферы

Цитирование: 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.

Введение

Лидары, предназначенные для мониторинга земной атмосферы, позволяют проводить дистанционное зондирование характеристик облачных и аэрозольных полей. На сегодняшний день большинство аэрозольных лидаров работают в видимом или ближнем инфракрасном спектральных диапазонах и предназначены для диагностики крупномасштабной структуры аэрозольных полей в тропосфере, метеорологического обеспечения авиации в аэропортах, контроля аэрозольных загрязнений в промышленных центрах [1–4]. Однако для ряда практических приложений интерес представляют и статистические характеристики полей аэрозольных неоднородностей.

Современные лидары используют пространственное сканирование атмосферы, которое не позволяет проводить измерения характеристик аэрозольных полей в условиях сложного рельефа местности [5]. Данный недостаток может быть решён зондированием атмосферы без использования пространственного сканирования, при этом аэрозольное поле формируется в координатах «Дальность – Время», где время соответствует регистрируемым реализациям лидарного сигнала.

Алгоритм сегментации неоднородностей позволяет использовать их для анализа аэрозольного поля атмосферы и измерения скорости и направления ветра [6]. Основными сложностями обработки регистрируемого поля является его нестационарность по дальности и времени и наличие паразитных точечных объектов на трассе зондирования [7].

Статья посвящена описанию разработанного алгоритма сегментации аэрозольных неоднородностей для поля относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния в координатах «Дальность – Время». Приведены результаты применения алгоритма для полей, регистрируемых лидаром упругого рассеяния в приземном слое атмосферы на безопасной для глаз длине волны 355 нм [8].

Макет аэрозольного лидара для измерения характеристик полей аэрозольных неоднородностей атмосферы на длине волны 355 нм

На рис. 1 показана структурно-функциональная схема макета аэрозольного лидара для измерения характеристик полей аэрозольных неоднородностей атмосферы на длине волны 355 нм. Источником излучения является Nd³⁺: YAG лазер EKSPLA NL204, в качестве фотодетектора использовался ФЭУ Hamamatsu H7826-013, а для преобразования регистрируемого сигнала в цифровой вид – высокоскоростной АЦП NI PXIe-5171R.

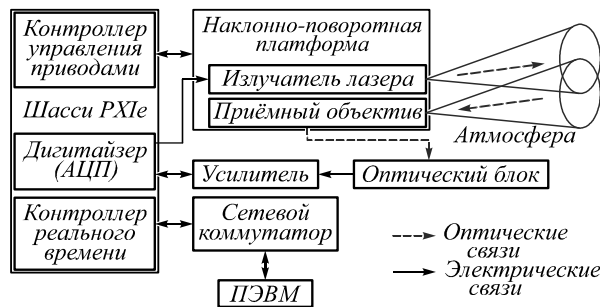


Рис. 1. Структурно-функциональная схема макета аэрозольного лидара

В табл. 1 представлены основные технические характеристики разработанного макета.

Табл. 1. Основные характеристики макета лидара

Характеристика	Значение
Длина волны излучения, нм	355
Мощность импульса лазера, мДж	1,3
Длительность лазерного импульса, нс	7
Полная расходимость лазерного пучка, мрад	< 3
Частота повторения импульсов, Гц	10 – 500
Фокусное расстояние объектива, мм	350
Относительное отверстие	1 : 2,6
Поле зрения приемной системы, мрад	4,3

Обработка данных лазерного зондирования

При лидарном зондировании атмосферы пространственное распределение неоднородностей проявляется в виде флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $\tilde{\beta}_i(r)$. В процессе обработки измерений каждая реализация мощности регистрируемого лазерного сигнала $P_i(r)$, которая имеет прямую зависимость от значения $\beta_i(r)$, нормируется на величину сглаженного среднего по серии зондирующих импульсов значения регистрируемой реализации лазерного сигнала $\bar{P}(r)$. Это позволяет выделить из регистрируемого, обратно рассеянного атмосферой в сторону приемника лазерного сигнала относительные флуктуации (коэффициент вариации) объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы [6, 7]:

$$\Delta_{\beta} = \frac{P_i(r) - \bar{P}(r)}{\bar{P}(r)} \approx \frac{\tilde{\beta}_i(r)}{\bar{\beta}(r)}, \quad (1)$$

где

r – расстояние от лидара до рассеивающего объема атмосферы;

$\tilde{\beta}_i(r)$ – пространственное распределение флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы для i -го лазерного импульса;

$\bar{\beta}(r)$ – пространственное распределение среднего значения объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы.

Основными параметрами аэрозольных неоднородностей являются:

1. Размер, который может быть оценён радиусом автокорреляционной функции (АКФ) по уровню $1/e$ сигнала по центру неоднородности.
2. Выраженность неоднородностей, характеризующая контрастом и коэффициентом вариации Δ_{β} .
3. Время жизни τ .
4. Скорость перемещения из-за наличия ветра.

На макете лидара проводилась регистрация аэрозольных неоднородностей атмосферы в виде двумерного поля в координатах «Дальность – Время», где время t_i соответствует моменту регистрации реализации лидарного сигнала от i -го лазерного импульса, а дальность – расстоянию от лидара до текущего рассеивающего объема атмосферы, которое измерялось по задержке лазерного сигнала на трассе «лидар – рассеивающий объем атмосферы – лидар».

На рис. 2 приведён пример экспериментально измеренного поля аэрозольных неоднородностей.

Наиболее контрастная аэрозольная неоднородность наблюдается на расстоянии порядка 270...280 м от лидара и с начала времени измерения до 4,5 с (потом она выходит под действием ветра из лазерного пучка и больше не наблюдается). Остальные неоднородности менее контрастные.

Обработка данных лидарного зондирования затруднена наличием дробового шума на изображении, вызванного как самим лазерным сигналом, так и фоновым излучением [7]. Дробовой шум является при-

чиной появления на изображении «псевдонеоднородностей», контраст которых может быть значительным. Дробовой шум также вызывает флуктуации внутри изображений аэрозольных неоднородностей.

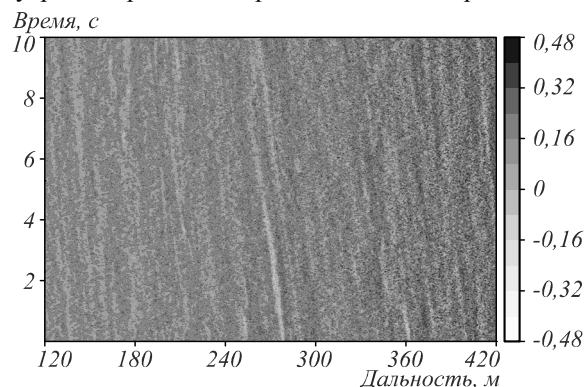


Рис. 2. Пример поля аэрозольных неоднородностей

При допущении о локальной стационарности сигналов использование классических методов фильтрации (фильтр скользящего среднего, вейвлет-фильтрация, фильтрация на основе преобразования Фурье и т.п.), уменьшая контраст «псевдонеоднородностей» и увеличивая их размеры, делает их похожими на аэрозольные неоднородности уже не только по величине контраста, но и по размерам. Это показано на рис. 3, где приведено то же поле аэрозольных неоднородностей, что и на рис. 2, но после применения фильтра скользящего среднего с окном, размер которого составляет 9×9 пикселей ($5,4 \text{ м} \times 0,18 \text{ с}$).

При регистрации последовательности реализаций лидарных сигналов считается, что действует гипотеза Тейлора о «замороженности турбулентности» [9], согласно которой турбулентные характеристики атмосферы являются постоянными и не изменяются за малый промежуток времени. Источниками нестационарности регистрируемого поля по времени являются флуктуации мощности лазерного импульса и появление неоднородностей.

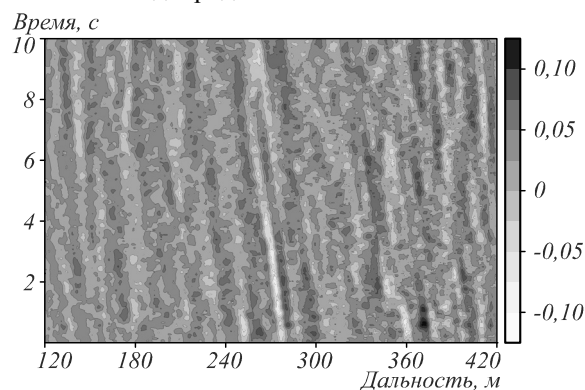


Рис. 3. Пример поля аэрозольных неоднородностей после применения фильтра скользящего среднего размером 9×9

Алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей на поле коэффициента вариации лидарного сигнала

На сегодняшний день существуют различные подходы к анализу нестационарных сигналов и изобра-

жений: методы адаптивной фильтрации сигналов, анализ с использованием вейвлетов и каскадов Хаара, оконное Фурье-преобразование и использование искусственных нейронных сетей [10–12].

Применение этих алгоритмов не гарантирует выделение неоднородностей различного масштаба без искажения их действительных характеристик – размеров и коэффициента вариации Δv , поэтому возникает необходимость разработки алгоритма надёжной сегментации аэрозольных неоднородностей.

В статье предложен метод сегментации аэрозольных неоднородностей на основе анализа двумерной автокорреляционной функции поля неоднородностей.

Использование данного алгоритма позволяет фильтровать шум и паразитные точечные объекты и сегментировать аэрозольные неоднородности на двумерном поле в координатах «Дальность – Время» различного масштаба без искажений размеров и формирования «псевдооднородностей». Реализация алгоритма использует свёрточные операции на графическом процессоре, что позволяет распараллеливать вычисления и проводить их в режиме реального времени [12].

Разработанный алгоритм сегментации проводится в несколько этапов:

1. Для поля флуктуаций коэффициента обратного аэрозольного рассеяния используется скользящее окно размером 9×9 пикселей, для которого вычисляется двумерная автокорреляционная функция.

2. Для каждой посчитанной двумерной АКФ определяется радиус корреляции одномерной АКФ по дальности и по времени. На рис. 4 и 5 показаны одномерные АКФ по дальности и по времени для случаев, когда в скользящем окне аэрозольная неоднородность присутствует и отсутствует. В случае отсутствия неоднородности наблюдается пик, который соответствует дельта-коррелированному шуму, а в случае наличия неоднородности пик уширяется, что говорит о наличии неоднородности.

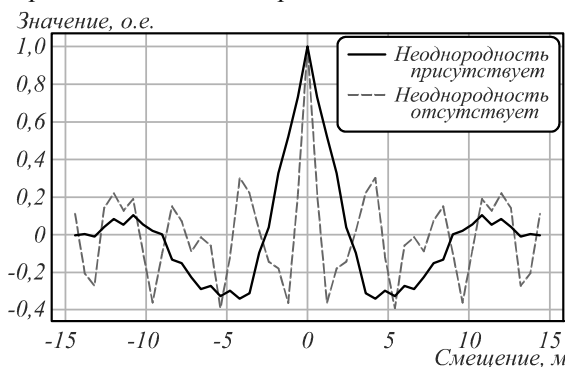


Рис. 4. Одномерные АКФ по дальности для случая наличия и отсутствия неоднородности

3. Значения радиусов корреляции одномерных АКФ по уровню $1/e$ присваиваются центральному пикселю в скользящем окне, при этом создаётся два поля: радиусов корреляции АКФ по дальности и по времени.

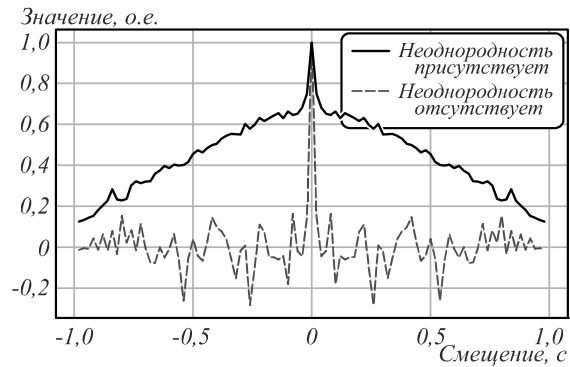


Рис. 5. Одномерные АКФ по времени для случая наличия и отсутствия неоднородности

4. Для полей радиусов корреляции АКФ по дальности и времени применяется пороговая обработка, в результате которой получаются два бинарных поля.

5. Применяется операция логического И к этим двум полям, и получается маска фильтрации (рис. 6).

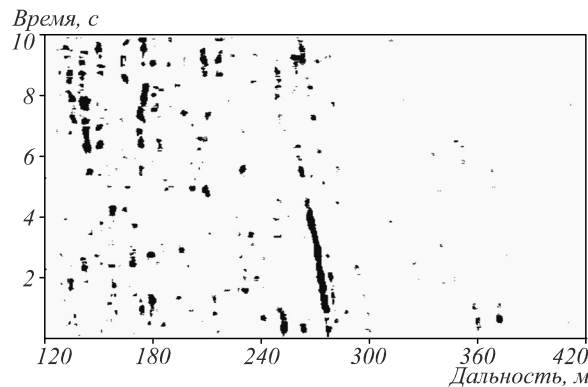


Рис. 6. Маска для фильтрации поля неоднородностей

6. Полученная маска умножается на исходное поле, и в результате получается отфильтрованное поле неоднородностей (рис. 7).

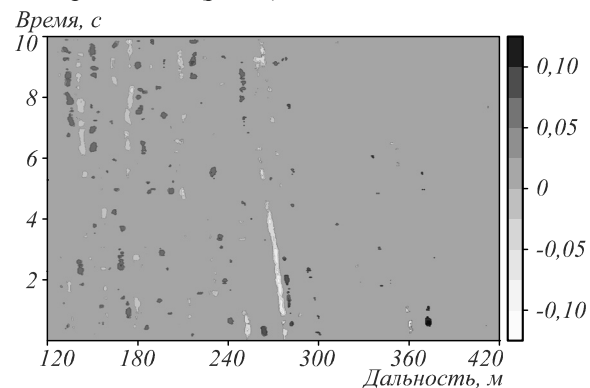


Рис. 7. Отфильтрованное поле неоднородностей

Отметим, что в результате применения алгоритма получается поле неоднородностей, отфильтрованное от шума и паразитных объектов вне неоднородностей. Для фильтрации шума внутри каждой неоднородности необходима дополнительная обработка.

Отфильтрованное поле позволяет анализировать размер и контраст неоднородностей. Оно также может быть использовано для улучшения точности оценки скорости и направления ветра за счёт более

точного определения размеров, которые влияют на погрешность измерения [6].

Для данных, полученных в весенне-осенний период с 2015 по 2017 г., были проанализированы поля неоднородностей в диапазоне дальностей от 120 до 420 м, что соответствует максимальным значениям отношения сигнал/шум на трассе зондирования. Для них был применён разработанный алгоритм сегментации и получена гистограмма распределения размеров неоднородностей (рис. 8) и аппроксимация плотности распределения (сплошная кривая) для более чем 1 500 неоднородностей.

Из рис. 8 видно, что размеры аэрозольных неоднородностей лежат в диапазоне ~1–10 м, что согласуется с экспериментальными данными в видимом диапазоне спектра [9].

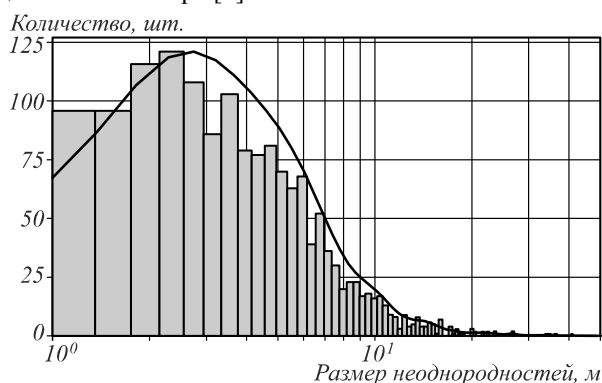


Рис. 8. Гистограмма распределения размеров неоднородностей после применения разработанного алгоритма фильтрации

Для сравнения на рис. 9 показана гистограмма распределения размеров неоднородностей после применения фильтра скользящего среднего размером 9×9 . Хорошо видно, что приведённая на рис. 9 гистограмма сильно искажает действительное распределение размеров неоднородностей.

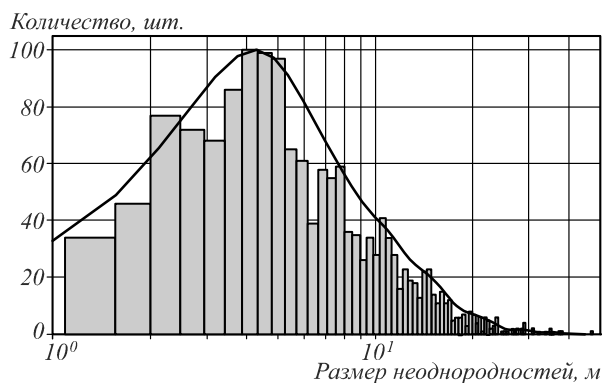


Рис. 9. Гистограмма распределения размеров неоднородностей после применения фильтра скользящего среднего

Заключение

Разработан алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей на поле относительных флуктуаций коэффициента обратного рассеяния, регистрируемого в координатах «Дальность – Время», на

основе скользящего окна двумерной корреляционной функции. Полученный метод позволяет надежно выделять неоднородности, что может быть использовано в практических целях для исследования аэрозольного поля атмосферы и улучшения оценки скорости и направления ветра. Показано применение разработанного метода для получения гистограммы распределения размеров аэрозольных неоднородностей из данных лидарного зондирования на длине волны 355 нм.

Литература

1. **Самойлова, С.В.** Аэрозольные слои тропосферы: однородность в высотном распределении оптических и микрофизических характеристик / С.В. Самойлова, Ю.С. Балин, Г.П. Коханенко, И.Э. Пеннер // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 12. – С. 1043-1049. – DOI: 10.15372/AOO20161206.
2. **Yorks, J.E.** An overview of the CATS level 1 processing algorithms and data products / J.E. Yorks, M.J. McGill, S.P. Palm, D.L. Hlavka, P.A. Selmer, E.P. Nowottnick, M.A. Vaughan, S.D. Rodie, W.D. Hart // Geophysical Research Letters. – 2016. – Vol. 43, Issue 9. – P. 4632-4639. – DOI: 10.1002/2016GL068006.
3. **Weitkamp, C.** Lidar: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere / C. Weitkamp. – New York: Springer-Verlag, 2005. – 456 p. – ISBN: 978-0-387-40075-4.
4. **Разенков, И.А.** Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений / И.А. Разенков // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 1. – С. 52-63.
5. **Mayor, S.D.** Comparison of an analog direct detection and a micropulse aerosol lidar at 1.5- μ m wavelength for wind field observations – with first results over the ocean / S.D. Mayor, P. Dérian, C.F. Mauzey, S.M. Spuler, P.L. Ponsardin, J.D. Pruitt, D. Ramsey, N.S. Higdson // Journal of Applied Remote Sensing. – 2016. – Vol. 10, Issue 1. – 016031. – DOI: 10.1117/1.JRS.10.016031.
6. **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(95). – С. 40-52.
7. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков; под ред. В.Н. Рождествина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – 573 с. – ISBN: 978-5-7038-3436-7.
8. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с.
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. **Джиган, В.И.** Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с. – ISBN: 978-5-94836-342-4.
11. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с. – ISBN: 978-5-94836-331-8.
12. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадуриин, Е. Архангельская. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с. – ISBN: 978-5-496-02536-2.

Сведения об авторах

Филимонов Павел Анатольевич, 1991 года рождения, в 2014 году окончил МГТУ им. Баумана по специальности 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии», является аспирантом 4-го года обучения по специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы», работает инженером в Московском исследовательском центре Самсунг. 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.

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.

Иванов Сергей Евгеньевич, 1982 года рождения, окончил в 2007 г. 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.

ГРПТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г. Окончательный вариант – 12 мая 2018 г.

AN ALGORITHM FOR SEGMENTATION OF AEROSOL INHOMOGENEITIES

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

¹*Graduate school of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

²*Research Institute of Radioelectronics and Laser Technologies of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

Abstract

We have developed an algorithm for segmentation of aerosol inhomogeneities in the registered field of lidar signal fluctuations in the atmosphere in the "Range – Time" coordinates that is based on a sliding window of a two-dimensional autocorrelation function. The obtained algorithm allows us to robustly detect aerosol inhomogeneities, which can be used in practical applications to study aerosol fields in the atmosphere and improve the accuracy of estimating the speed and direction of winds. The developed method was applied for obtaining a histogram of aerosol inhomogeneity-size distribution from 355-nm elastic lidar measurements data in the surface layer.

Keywords: digital image processing, lidar, aerosol inhomogeneities, surface layer.

Citation: Filimonov PA, Belov ML, Fedotov YuV, 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.

References

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Samoilova SV, Balin YuS, Kokhanenko GP, Penner IE. Investigations of the vertical distribution of troposphere aerosol layers based on the data of multifrequency Raman lidar sensing: Part 1. <i>Methods of optical parameter retrieval. Atmospheric and Ocean Optics</i> 2009; 22(3): 302-315. DOI: 10.1134/S1024856009030075.</p> <p>[2] Yorks JE, McGill MJ, Palm SP, Hlavka DL, Selmer PA, Nowotnick EP, Vaughan MA, Rodie SD, Hart WD. An overview of the CATS level 1 processing algorithms and</p> | <p>data products. <i>Geophysical Research Letters</i> 2016; 43(9): 4632-4639. DOI: 10.1002/2016GL068006.</p> <p>[3] Weitkamp C. <i>Lidar: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere</i>. New York: Springer-Verlag; 2005. ISBN: 978-0-387-40075-4.</p> <p>[4] Razenkov IA. Aerosol lidar for continuous atmospheric monitoring. <i>Atmospheric and ocean optics</i> 2013; 26(4): 308-319. DOI: 10.1134/S1024856013040118.</p> <p>[5] Mayor SD, Dérian P, Mauzey CF, Spuler SM, Ponsardin PL, Pruitt JD, Ramsey D, Higdson NS. Comparison of an analog direct detection and a micropulse aerosol lidar at</p> |
|--|--|

- 1.5- μm wavelength for wind field observations – with first results over the ocean. *Journal of Applied Remote Sensing* 2016; 10(1): 016031. DOI: 10.1117/1.JRS.10.016031.
- [6] 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.
- [7] Kozintcev VI, Belov ML, Orlov VM, Gorodnichev VA, Strelkov BV, Rozhdestvin VN, ed. *Laser remote sensing* [In Russian]. Moscow: “BMSTU” Publisher; 2010. ISBN: 978-5-7038-3436-7.
- [8] GOST 31581-2012. *Laser safety. General safety requirements for the development and operation of laser products* [In Russian]. Moscow: “Standardinform” Publisher; 2013.
- [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] Djigan VI. *Adaptive signal filtering: theory and algorithms* [In Russian]. Moscow: “Technosphere” Publisher; 2013. ISBN: 978-5-94836-342-4.
- [11] Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2008. ISBN: 978-0-13-168728-8.
- [12] Nikolenko S, Kadurin A, Arkhangelskaya E. *Deep learning: Immersion in the world of neural networks* [In Russian]. Saint-Petersburg: “Piter” Publisher; 2018. ISBN: 978-5-496-02536-2.

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 is a student of Graduate School of Bauman Moscow State Technical University and works as the engineer 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 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.

Yury Victorovich Fedotov (b. 1952) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1998. He works as science researcher at 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.

Sergey Evgenievich Ivanov (b. 1982) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. He works as the science researcher at 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.

Received March 14, 2018. The final version – May 12, 2018.
