

УДК 551.501.816

Лидары для контроля метеопараметров и аэрозольно-газового состава в приземном слое атмосферы

А.С. Борейшо¹, М.А. Коняев¹, А.С. Михайленко²

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, 1,

E-mail: konyaev@lsystems.ru

² ООО «НПП «Лазерные системы» Россия, г. Санкт-Петербург,
п. Стрельна, ул. Связи д. 34, лит. А

В статье рассмотрены основные принципы работы лидаров. Представлены результаты аэрозольного одночастотного сканирования с помощью лидаров для картографирования аэрозольных выбросов в режиме реального времени. Рассмотрены особенности выбора длин волн для лидаров дифференциального поглощения и особенности обработки данных экспериментов. Представлены результаты, полученные с помощью когерентных доплеровских лидаров при решении задач детектирования крупномасштабных турбулентных явлений, таких как сдвиг ветра.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лидар дифференциального поглощения, доплеровский лидар, сдвиг ветра.

Введение

С точки зрения оптических свойств атмосфера является аэрозольно – газовой средой. Большинство эффектов взаимодействия оптического излучения с аэрозолями и молекулами осуществляется независимо, поэтому методы лазерного изучения атмосферных компонентов разделяются на ряд классов в зависимости от задачи и используемого явления взаимодействия света с атмосферной средой. При распространении лазерного излучения в атмосфере происходит взаимодействие излучения со составными частями атмосферы, аэрозолями и молекулами [1]. На рисунке 1 схематически представлены основные процессы взаимодействия.

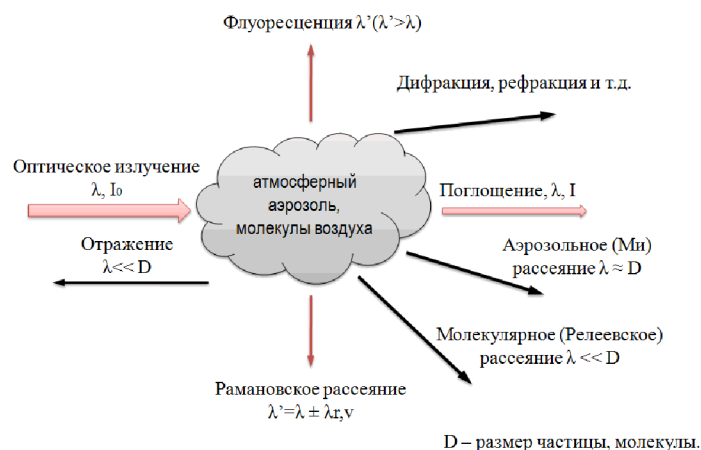


Рисунок 1 - Основные типы взаимодействия излучения с атмосферой.

В методах лидарного зондирования основанных на аэрозольном рассеянии (рассеянии Ми) используют зависимость лидарных сигналов от формы и размера частиц. Метод одночастотного лазерного зондирования аэрозоля эффективен с точки зрения, оценки профиля коэффициента ослабления или обратного рассеяния на фиксированной длине волны. Молекулярная (газовая) атмосфера при лазерном зондировании проявляется в поглощении, в явлениях молекулярного (релеевское), комбинационного, резонансного рассеяния и флуоресценции. Указанные явления отличаются интенсивностью или сечениями взаимодействия и соответственно возможностями для достоверной регистрации сигналов.

Можно выделить следующие основные типы лидаров, которые способны детектировать и идентифицировать химический состав, а также физические параметры атмосферы, схематично процессы, на которых они основаны, соответствующие типы лидаров и результаты измерений представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 - Основные типы лидарных систем.

Каждый тип лидара основан на характерном взаимодействии с особенностями, которые надо учитывать при разработке лидарной системы, особенно если система является комплексной и включает в себя несколько типов лидаров.

Аэрозольные одночастотные лидары

Коэффициенты аэрозольного рассеяния (β) и ослабления (α) определяют мощность рассеянного зондирующего излучения, которая собирается приемной апертурой лидара. В предположении однократного рассеяния, сигнал одночастотного лазерного зондирования аэрозольной атмосферы на длине волны λ описывается уравнением лазерной локации [1], справедливого в условиях слабого вклада многократного рассеяния:

$$P_r(\lambda, r) = \eta_{all} \eta_g(r) P_0 \left[\frac{c\tau}{2} \right] \frac{A_r}{r^2} \beta(\lambda, r) \exp\left\{-2 \int_0^r \alpha(\lambda, r) dr\right\} + P_{bg}$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера, r – дальность с которой принимается сигнал, λ – длина волны лазера, η_{all} – общая эффективность лидарной системы, c – скорость света, τ – длительность лазерного импульса, $\eta_g(r)$ – геометрический фактор (зависит от геометрии оптической системы лидара, максимальное значение равно – 1), A_r – площадь приемной

антенны, $\beta(\lambda, r)$ – аэрозольный коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(\lambda, r)$ – аэрозольный коэффициент ослабления, P_{bg} – мощность фонового сигнала.

В одно уравнение лидарной локации входят две оптические аэрозольные характеристики. Данное обстоятельство затрудняет обработку лидарных сигналов, но применительно к конкретным аэрозольным ситуациям, и внося некоторые допущения, можно вывести достаточно эффективные методы решения лидарного уравнения и оценки α или β .

Для решения лидарного уравнения относительно α или β при проведении зондирования атмосферы используются один из следующих методов: метод логарифмической производной, метод асимптотического сигнала, метод интегрального накопления или метод Клетта. При использовании указанных методов восстановления параметров атмосферы необходимо провести первоначальную обработку данных лидарного зондирования. Она заключается в следующих этапах:

- вычитание фона
- нормировка на R^2
- нормирование на геометрический фактор (если требуется)

На рисунке 3 представлены результаты, полученные аэрозольным лидаром при детектировании аэрозольно-газового образования в режиме реального времени.

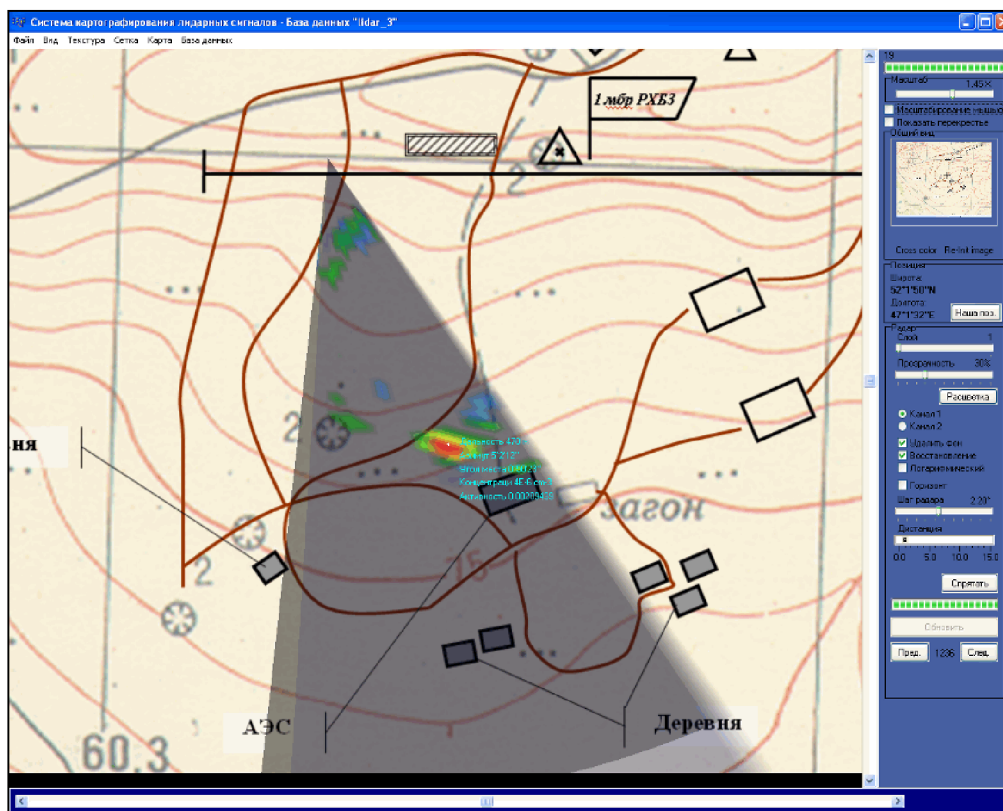


Рисунок 3 - Картографирование аэрозольного следа в режиме аэрозольного сканирования

Лидары для исследования газового состава атмосферы

В классической схеме лидара дифференциального поглощения используется две длины волны, одна из которых имеет более сильное поглощение газом, чем другая, и они соответственно обозначаются on и off. Особенности спектрального поглощения различных молекул обуславливают выбор рабочих длин волн. В случае узкополосного поглощения, “on” длина волны выбирается таким образом, чтобы она попадала в линию поглощения газа, а “off” длина, не поглощалась или имела минимальный коэффициент поглощения. На рисунке 4 приведен пример выбора длин волн для узкополосного спектра поглощения на примере молекулы метана. Для широкополосного спектра поглощения, например как у озона выбор длин волн осуществляется исходя из требуемой разности поглощения (см. рисунок 4). При выборе длин волн зондирования, необходимо также учитывать возможное перекрытие с полосами поглощения других газов. Кроме того, при выборе длин волн желательно иметь небольшую разницу, чтобы характеристики аэрозоля не влияли на ошибку детектирования.

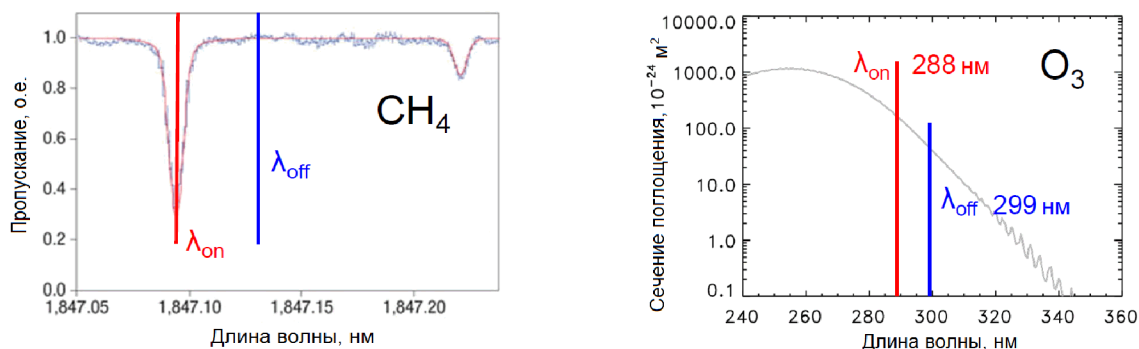


Рисунок 4 – Пример выбора длин волн для метода дифференциального поглощения при различных типах спектра поглощения.

В ультрафиолетовой области (220-400 нм) возможности лидаров для газоанализа сильно ограничены вследствие поглощения кислорода ниже 220 нм. В УФ-диапазоне находятся спектры поглощения многих газов, в частности: SO_x, O₃, NO, NO₂, Cl₂, и др. В видимом диапазоне (400-700 нм) несколько газов имеют линии поглощения, пригодные для использования в ДП методе: N₂O, I₂, и H₂O. В среднем ИК диапазоне (1-25 мкм) многие газы имеют характерные особенности поглощения. Линии поглощения в ИК спектральном диапазоне в основном обусловлены колебательно-вращательными переходами, а в УФ диапазоне они определяются электронными переходами молекул.

Концентрация газовой составляющей $N(R)$, усредненная по пространственному интервалу ΔR , определяется по формуле:

$$N(R) = \frac{1}{2(K(\nu_{on}, R) - K(\nu_{off}, R))\Delta R} \ln \left[\frac{P(\nu_{on}, R)P(\nu_{off}, R + \Delta R)}{P(\nu_{off}, R)P(\nu_{on}, R + \Delta R)} \right]$$

где $K(\nu_{on}, R)$ и $K(\nu_{off}, R)$ - значения коэффициентов поглощения вдоль трассы зондирования в точке R на частотах, расположенных внутри ν_{on} и вне ν_{off} контура селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты, предварительно рассчитываемые с использованием высотных модельных профилей метеопараметров атмосферы; $P(\nu_{on}, R), P(\nu_{off}, R), P(\nu_{on}, R + \Delta R)$ и $P(\nu_{off}, R + \Delta R)$ - значения лазерных сигналов на частотах зондирования ν_{on} и ν_{off} из точек R и $R + \Delta R$ по трассе зондирования, регистрируемые приемной системой лидара.

Графики на рисунке 5 иллюстрируют идеальные сигналы на on и off длинах волн получаемые с детектора лидара, в зависимости от распределения концентрации по трассе зондирования.

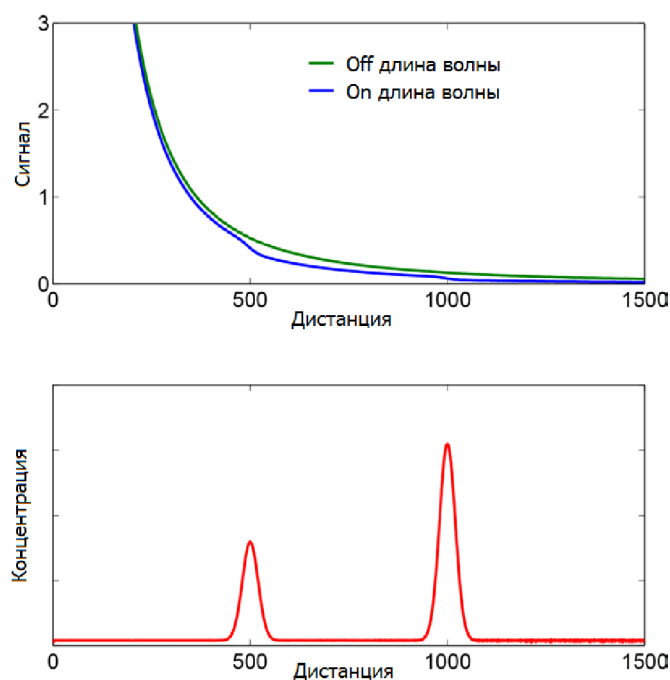


Рисунок 5 - Характерный вид сигналов в лидаре дифференциального поглощения.

Однако, в лидарном уравнении, из которого восстанавливается концентрация искомого газа помимо свойств атмосферных газов и аэрозоля на рабочих длинах волн присутствует геометрический фактор лидара для каждой длине волны. Разницу геометрического фактора необходимо учитывать при проведении измерений тщательной юстировкой оптической системы или проведением калибровочных тестовых измерений для последующей нормировки получаемых данных. Кроме того, при проведении длительных измерений, т.е. когда сигнал записывается дольше, чем время изменения атмосферных условий возможна сильная деградация восстановленных данных.

В настоящее время известно более 100 стационарных и мобильных ДП-лидаров наземного и воздушного базирования для определения концентрации атмосферных газов и обнаружения опасных примесей в атмосфере.

Наличие сканера позволяет проводить измерения в любом направлении и отслеживать в режиме реального времени загрязнение воздуха. На рисунке 6 приведены результаты измерения концентрации SO_2 в выхлопе транспортного корабля с интервалом в 2 минуты [2]

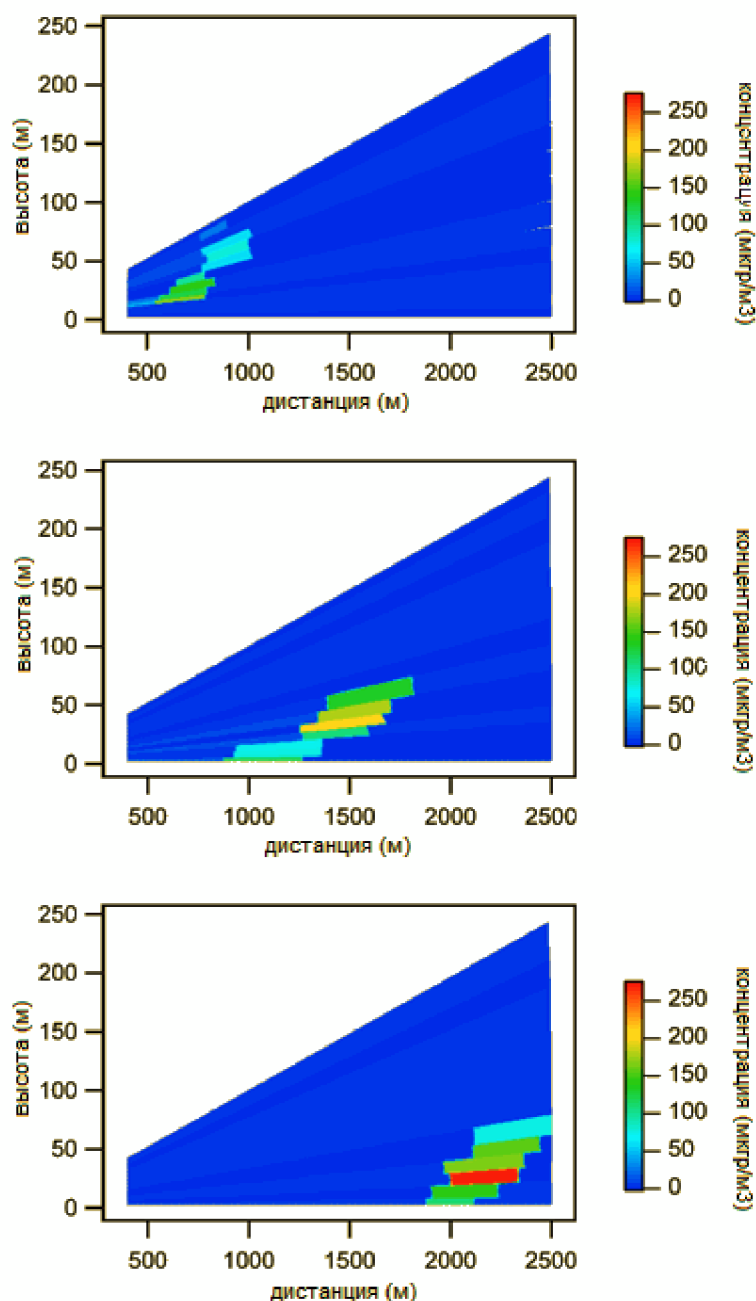


Рисунок 6 - Измерения концентрации SO_2 в выхлопе корабля.

Когерентные доплеровские лидары

Измерения скорости ветра особенно важно для некоторых областей прикладной науки, например метеорологии и авиационной безопасности. Точное измерение ветра, как его скорости, так и его направления, становится наиболее актуальным при наличии не контролируемых и случайных флуктуаций, например при расчете вызываемой турбулентности при полете самолета, а также в ветровой энергетике для оптимального направления оси ветряка в направлении ветра.

Доплеровский лидар измеряет радиальную (по направлению распространения зондирующего излучения) скорость, используя изменение частоты обратно рассеянного излучения, которое возникает за счет эффекта Доплера:

$$\Delta f = -\frac{2V_r}{\lambda}$$

где: V_r – радиальная скорость, λ – длина волны зондирующего лазера, Δf – частотный доплеровский сдвиг.

Для измерения полного вектора скорости ветра необходимо проводить измерения как минимум, в трех направлениях.

Оптическое гетеродинирование, лежащие в основе когерентного приема является аналогом гетеродинирования в радиодиапазоне. В общем виде оптическая мощность на приемной площадке описывается следующим уравнением [3]:

$$P_c = P_c + P_z + 2\sqrt{P_c P_z} \cos(j2\pi(f_c - f_z)t + (\phi_c - \phi_z))$$

где: P_c – мощность сигнального излучения, рассеянного атмосферой и собранного приемным телескопом, P_z – мощность гетеродина на приемнике, f и ϕ соответственно частота, и фаза опорного и сигнального излучения.

Первые два слагаемых при обработке сигнала с приемника фильтруются низкочастотным фильтром. После этой фильтрации анализируется третье слагаемое:

$$P_c \approx 2\sqrt{P_c P_z} \cos(j2\pi(f_c - f_z)t + (\phi_c - \phi_z))$$

С учетом того что разница частот гетеродина и сигнального излучения лежит в радиодиапазоне, то можно применять технику с плоской пропускания несколько мегагерц, что позволяет повысить отношение сигнал/шум.

В России разрабатывалось несколько опытных образцов лидаров на основе CO_2 лазеров [4], а также на основе полупроводниковых лазеров и волоконных усилителей [5]. В ООО «НПП «Лазерные системы» была разработана серия когерентных доплеровских лидаров на основе полупроводниковых лазеров и волоконных компонент, способных проводить круглосуточные измерения. Внешний вид лидаров представлен на рисунке 7.



ПЛВ300



ПЛВ2000

Рисунок 7 - Внешний вид лидаров ПЛВ300 и ПЛВ2000

Основные технические характеристики разработанных доплеровских лидаров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики ПЛВ300 и ПЛВ2000.

	ПЛВ-300	ПЛВ2000
Дальности измерения	от 5 до 300 м	от 60 до 2000 м
Диапазон измерения скоростей	от 1 до 40 м/с	от 1 до 55 м/с
Диапазон измерения направления ветра	от 0 до 360°	от 0 до 360°
Длина волны лазерного излучения	1550 нм	1550 нм
Пространственное разрешение	± 10% от дистанции фокусировки	60 м
Время обновления данных	4 сек.	1-10 сек.
Режим сканирования	VAD	VAD, DBS, RHI, PPI, LOS
Масса	70 кг	150 кг
Габаритные размеры	450x900x1300 мм	885x1005x1745 мм

ПЛВ300 и ПЛВ2000 являются когерентными доплеровскими лидарами. Основное их отличие друг от друга в режиме работы излучателя, излучение лазерного источника в ПЛВ300 непрерывное, а в ПЛВ2000 импульсное. Пространственное разрешение ПЛВ2000 определяется длительностью импульса излучения, и является постоянной на всех высотах зондирования. Длительность импульса ПЛВ2000 порядка 400 нс по полувысоте, что

соответствует пространственному разрешению 60 метров. На рисунке 8 приведены нормированные графики функции, описывающие пространственное разрешение для ПЛВ300 и ПЛВ2000 на дистанциях измерения 50, 100, 200 и 300 метров. На дистанциях измерения менее 200 метров непрерывный лидар имеет значительно лучшее пространственное разрешение, что делает ПЛВ300 незаменимым инструментом для детектирования низковысотного сдвига ветра и (или) микропорыва. В тоже время, при измерении на высотах более 300 метров преимущество оказывается у лидара ПЛВ2000 благодаря фиксированному пространственному разрешению.

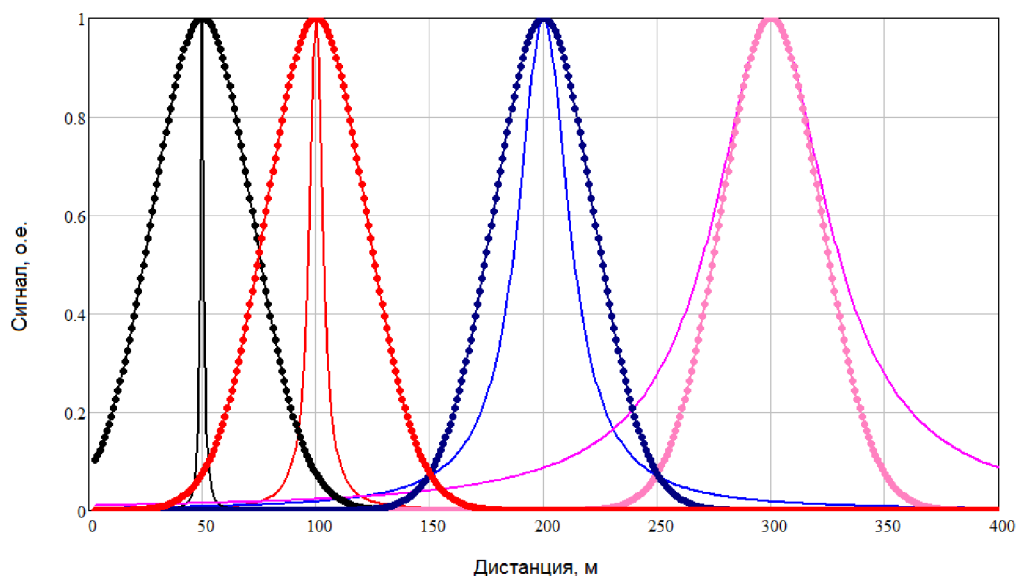


Рисунок 8 - Функции пространственного разрешения для ПЛВ300 и ПЛВ2000
(сплошная линия – ПЛВ300, линия с точками – ПЛВ2000).

ПЛВ2000 имеет двухзеркальный сканирующий модуль, позволяющий сканировать все верхнюю полусферу и использовать различные методы сканирования и получения 3D картины распределения ветрового поля. В лидаре реализованы следующие основные режимы сканирования:

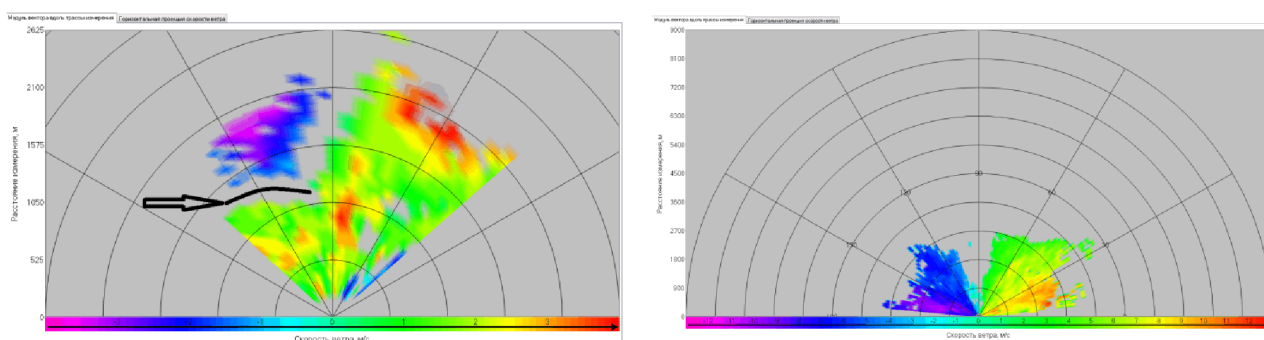
- круговое (секторное) сканирование (PPI);
- сканирование в вертикальной плоскости (RHI);
- режим профилометра (DBS, VAD);
- измерение в одном положении сканера (LOS)

Сдвиг ветра является характеристикой пространственной изменчивости ветра и определяется как векторная разность (или градиент) скоростей ветра в двух точках пространства, отнесенная к расстоянию между ними.

$$\beta = \frac{\Delta v}{\Delta z} = \frac{v_2 - v_1}{z_2 - z_1}$$

Различают вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра. Сдвиг ветра чаще всего происходит из-за вызванных нисходящими потоками, ударяющихся о землю и быстро распространяющихся во всех направлениях. Эти непредсказуемые изменения скорости и направления ветра усложняют управление самолетом, из-за постоянно меняющегося встречного ветра, попутного ветра и порывов вверх и вниз.

Измерение крупномасштабных турбулентных явлений, таких как горизонтальный или вертикальный сдвиг ветра может быть осуществлено с помощью лидара в режиме кругового или вертикального сканирования, а также профилометра. На рисунке 9 представлены результаты, полученные доплеровским лидаром, разработанным ООО «НПП «Лазерные системы» при вертикальном сканировании в одной плоскости. Рисунок 9а показывает детектирование вертикального сдвига ветра, характеризующий крупномасштабную турбулентность, для сравнения на рисунке 9б представлен результат сканирования однородного ветрового потока.



а) вертикальный сдвиг ветра (указан стрелкой)

б) однородный поток

Рисунок 9 – Детектирование доплеровским ИК-лидаром вертикального сдвига ветра в режиме RHI.

В режиме вертикального профилометра, также возможно детектирование сдвига ветра. На рисунке 10 представлены результаты, полученные ИК-лидаром в режиме вертикального профилометра. На графиках горизонтальной скорости и направления отчетливо виден крупномасштабный сдвиг ветра на высотах от 300 метров до 1 км, заключающийся в уменьшении скорости ветра с 8 м/с на высоте 300 метров, до 4 м/с на высоте 700 метров и изменении направления на 80 градусов.

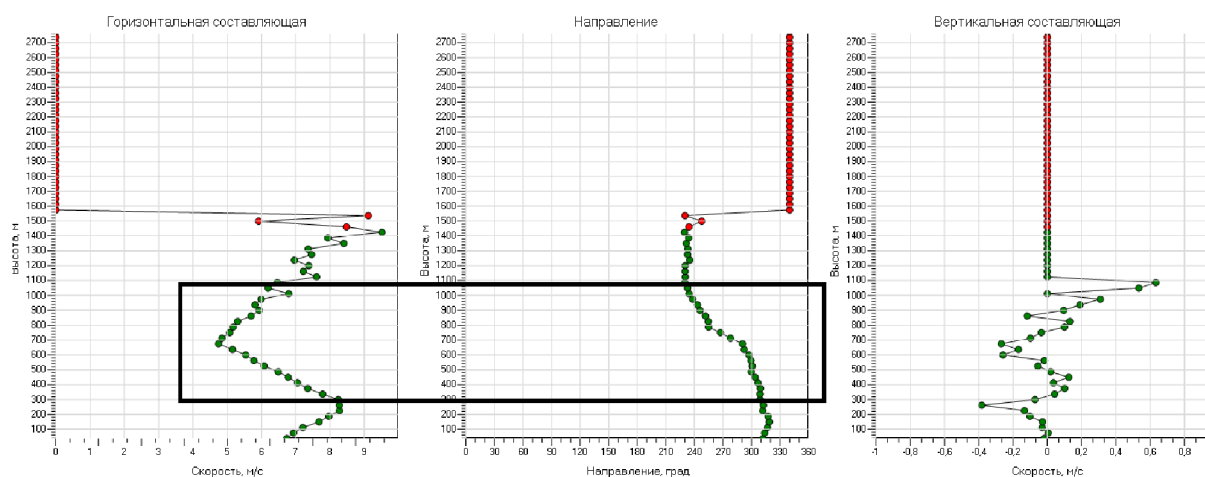


Рисунок 10 - Вертикальный профиль скорости и направления ветра при наличии сдвига ветра.

Таким образом, использование различных средств дистанционного зондирования атмосферы, позволяет обеспечить, необходимый поток данных об опасных метеоявлениях, аэрозольных и газовых выбросах.

Литература

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование // М.: «Наука» 1987, 550 с.
2. *Balzani Lööv J. M. et al.* Field test of methods to measure remotely SO_x and NO_x emissions // Atmos. Meas. Tech., 7, 2014, 2597–2613.
3. *Протопопов В.В., Устинов Н.Д.* Лазерное гетеродинамирование // под. ред. Н.Д. Устинова. - М.: Наука. 1985 г., 288 с
4. *Гордиенко В.М., Путивский Ю.Я.* Ветровой когерентный доплеровский ТЕА СО₂-лидар // Квантовая электроника. 1994. № 21 (3). С. 284–290.
5. *Ахметьянов В.Р. Васильев Д.Н. Ключков Д.В. Коняев М.А. Пенкин М.С. Орлов А.Е. и др.* Лидарный доплеровский профилометр для измерения параметров ветра в составе наземного комплекса метеорологического обеспечения аэронавигации. // Авиакосмическое приборостроение. – 2013, №9, С. 41-52.

Lidars for aerosol, gas pollutions and meteoparameters monitoring in boundary atmospheric layer

A.S. Boreysho¹, M.A. Konyaev¹, A.S. Michailenko²

¹ *BALTIC STATE TECHNICAL UNIVERSITY «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
190005, Saint-Petersburg, 1-st Krasnoarmeiskaya, 1,
E-mail: konyaev@lsystems.ru*

² *Laser Systems LLC 198515, St.Petersburg, SEZ Neudorf, Strelna, 34A, Svyazi str.*

Article gives theory about main aspects of remote sensing with lidars. Some results of online aerosol monitoring and mapping of aerosol clouds with one wavelength lidar are presented. Wavelength selection and signal processing of differential absorption lidars discussed. Results of vertical wind shear detection using coherent Doppler lidar in RHI and VAD scan mode are presented.

Key words: remote sensing, differential absorption lidar, coherent Doppler lidar, wind shear.