

УДК 551.557.6:621.371

Численное исследование возможностей ветрового зондирования в атмосферном слое 10–20 км когерентным доплеровским лидаром с борта самолета

И.Н. Смалихо, В.А. Банах*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 04.09.2023;
после доработки 14.09.2023;
принята к печати 21.11.2023

Численно исследованы возможности использования молекулярного рассеяния для определения скорости ветра с помощью импульсного когерентного доплеровского лидара (ИКДЛ) с борта самолета на высотах 10–20 км. Моделирование проводилось для сфокусированного на 500 м зондирующего излучения на длинах волн 1 и 2 мкм; диаметр апертуры приемопередающего телескопа 10 см. Показано, что при измерениях с самолета для превышения порогового значения отношения сигнал/шум потребуется энергия в импульсе, значительно меньшая, чем при зондировании с Земли. Современные ИКДЛ с энергией зондирующих импульсов 1–4 мДж после добавления канала регистрации молекулярного рассеяния могут применяться для самолетных измерений ветра на высотах 10–20 км.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, молекулярное рассеяние, скорость ветра, численное моделирование, зондирование, отношение сигнал/шум; coherent Doppler lidar, molecular scattering, wind speed, numerical simulation, sounding, signal-to-noise ratio.

Введение

Проблема использования импульсного когерентного доплеровского лидара (ИКДЛ), принцип работы которого основан на обратном рассеянии зондирующего излучения на аэрозольных частицах, для получения информации о скорости и направлении ветра на достаточно больших высотах (в частности, в стратосфере) заключается в том, что отношение сигнал/шум (SNR) у такого ИКДЛ ниже порогового значения $SNR_{\text{Тгр}}$ (условие $SNR > SNR_{\text{Тгр}}$ необходимо для получения приемлемых оценок скорости ветра). Это происходит из-за очень малой концентрации аэрозоля на таких высотах и, следовательно, крайне низких коэффициентах аэрозольного обратного рассеяния света $\beta_{\text{па}}$. Для лидара, использующего аэрозольное рассеяние, SNR пропорционально $\beta_{\text{па}}$ [1, 2]. При этом, несмотря на наличие в стратосфере аэрозольного слоя Юнге, коэффициент молекулярного обратного рассеяния света $\beta_{\text{пт}}$, как правило, более чем на порядок превосходит $\beta_{\text{па}}$ [3, 4]. Для решения данной проблемы в работе [5] впервые было предложено определять скорость ветра по измерениям ИКДЛ, использующего молекулярное рассеяние света. В [5] проведено численное исследование возможностей использования в ИКДЛ молеку-

лярного рассеяния и найдены пороговое значение энергии зондирующего импульса E_p и оптимальный диаметр приемопередающего телескопа ИКДЛ наземного базирования для получения надежной информации о ветре в прилегающем к Земле атмосферном слое до 10 км.

В работе [6] численно исследованы возможности использования молекулярного рассеяния для определения вектора скорости ветра с помощью когерентно сканирующего ИКДЛ наземного базирования в атмосферном слое на высотах от 10 до 20 км. Однако найденные пороговые значения E_p указывают на то, что для существующих в настоящее время ИКДЛ получение достоверной информации о ветре в атмосферном слое 10–20 км не представляется возможным. Одним из факторов, влияющих на SNR, является существенное падение уровня эхосигнала на довольно протяженной трассе между лидаром, находящимся на поверхности Земли, и рассматриваемым атмосферным слоем, в том числе и за счет искажения зондирующего излучения на турбулентных неоднородностях показателя преломления воздуха в пограничном слое атмосферы (толщина слоя около 1 км). В то же время для измерения ветра широко применяется ИКДЛ, размещенный на борту самолета (см., например, [7, 8]). Это позволяет существенно (по сравнению с ИКДЛ наземного базирования) уменьшить длину трассы зондирования, воспользоваться фокусировкой зондирующего пучка и избежать влияния оптической

* Игорь Николаевич Смалихо (smalikho@iao.ru);
Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru).

турбулентности на уровень лидарного эхосигнала. Следовательно, энергия зондирующего импульса, необходимая для достижения $\text{SNR} > \text{SNR}_{\text{Тгг}}$, может быть на порядки меньше, чем E_p наземных ИКДЛ.

Цель работы — численное исследование возможностей использования молекулярного рассеяния для определения скорости ветра с помощью импульсно-когерентного доплеровского лидара с борта самолета на высотах 10–20 км. В результате этого исследования определены требования к энергии зондирующего импульса.

1. Материалы и методы исследования

Так же, как и в [6], рассмотрим два случая: 1) ИКДЛ, испускающий зондирующее излучение на $\lambda = 1$ мкм, частотная полоса пропускания приемника $B = 4$ ГГц, промежуточная частота (разность частот опорного и зондирующего излучения) $f_I = 2$ ГГц; 2) ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм, $B = 2$ ГГц, $f_I = 1$ ГГц. Пусть у того и другого лидара длительность зондирующих импульсов $\tau_p = 500$ нс, частота следования $f_p = 1$ кГц. Для получения спектров мощности лидарного эхосигнала используется временное окно длительностью $T_w = \tau_p = 500$ нс. Следовательно, ширина спектрального канала $\Delta f = 1/T_w = 2$ МГц, а число спектральных каналов в измеряемом спектре $L = B/\Delta f$ равно соответственно 2000 и 1000 в случаях 1-микронного и 2-микронного ИКДЛ.

В отличие от [6], где численно моделируется работа ИКДЛ наземного базирования для случая посылки в атмосферу коллимированного лазерного пучка, в настоящей работе для ИКДЛ, находящегося на борту самолета, мы рассмотрим фокусировку зондирующего пучка на расстояние $F = 500$ м в атмосферном слое 10–20 км; диаметр апертуры приемопередающего телескопа $D = 10$ см (отношение диаметра зондирующего пучка в плоскости телескопа к D равно 0,8). Для расчетов SNR воспользуемся приведенными в [6] формулами (11)–(17). При этом можно положить атмосферное пропускание $T_A = 1$ и структурную характеристику показателя преломления воздуха $C_n^2 = 0$ (атмосферная турбулентность не учитывается).

На рис. 1 представлены результаты расчета $\text{SNR}(R)$, где R — расстояние от лидара вдоль оптической оси при $E_p = 1$ мДж и $F = 500$ м. Здесь же для сравнения приведены расчеты $\text{SNR}(R)$ для случая коллимированного зондирующего пучка ($F = \infty$). Видно, что благодаря фокусировке зондирующего пучка в окрестности его перетяжки ($R \sim F$) SNR многократно превышает соответствующую величину в случае коллимированного зондирующего пучка. Так, для ИКДЛ с $\lambda = 1$ мкм имеет место превышение примерно в 60 раз (на 17,7 дБ) и в 16 раз (на 12 дБ) в случае ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм.

Следует учесть, что в отличие от показанных на рис. 1 черных кривых измеряемые профили SNR будут несколько сглаженными из-за усреднения по зондируемому объему вдоль оптической оси.

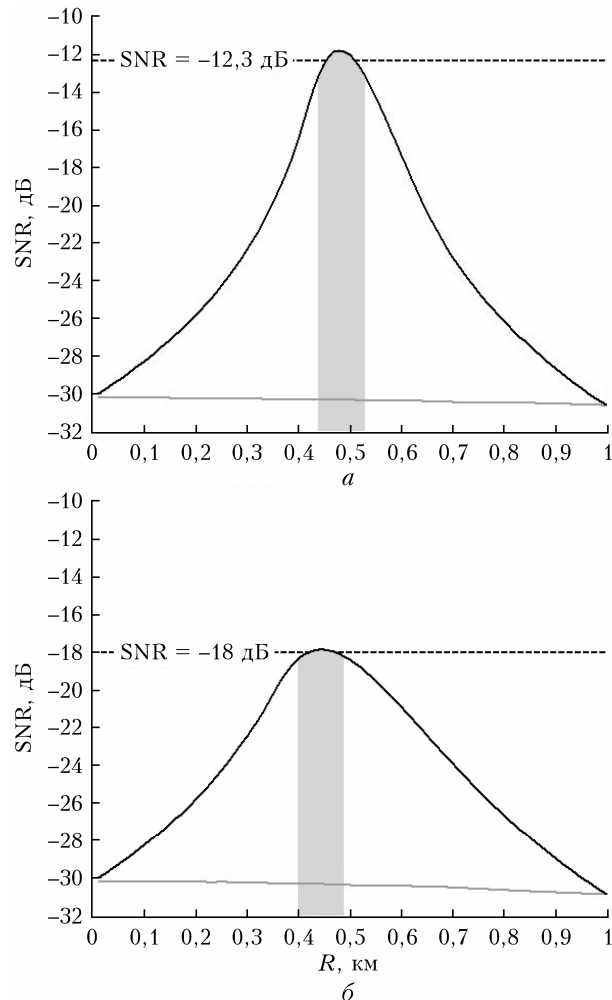


Рис. 1. Зависимости SNR от расстояния от лидара в случае 1-микронного (а) и 2-микронного (б) ИКДЛ с $E_p = 1$ мДж на высоте 10 км при колликации (серые кривые) и фокусировке на 500 м (черные кривые). Пунктирной линией указано SNR, усредненное в окрестности перетяжки лазерного пучка в пределах зондируемого объема; серым цветом отмечены области (шириной 100 м), центрированные в точке максимума черных кривых

По нашим расчетам в рассматриваемом здесь случае (временное окно равно длительности импульса 500 нс) продольный размер зондируемого объема $\Delta z \approx 100$ м.

Таким образом, согласно используемой здесь модели ИКДЛ на молекулярном рассеянии с $E_p = 1$ мДж и $D = 10$ см при приеме эхосигнала, проходящего с расстояния в окрестности перетяжки зондирующего пучка, на высоте 10 км у ИКДЛ с $\lambda = 1$ мкм SNR в 3,7 раза (на 5,7 дБ) больше, чем у ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм.

2. Результаты и обсуждение

С помощью модели высотного профиля $\beta_{\text{пл}}$ (см. формулу (17) в [6]) по аналогии с данными на рис. 1 ($D = 10$ см и $F = 500$ м) мы рассчитали SNR на различных высотах от 10 до 20 км для ИКДЛ

самолетного базирования с $\lambda = 1$ и 2 мкм. На рис. 2 представлены результаты таких расчетов при $E_p = 1$ мДж и 4 мДж. Видно, что SNR на высоте 20 км примерно в три раза (на 5 дБ) ниже соответствующей величины на высоте 10 км. Различие E_p в четыре раза обуславливает отличие SNR на 6 дБ.

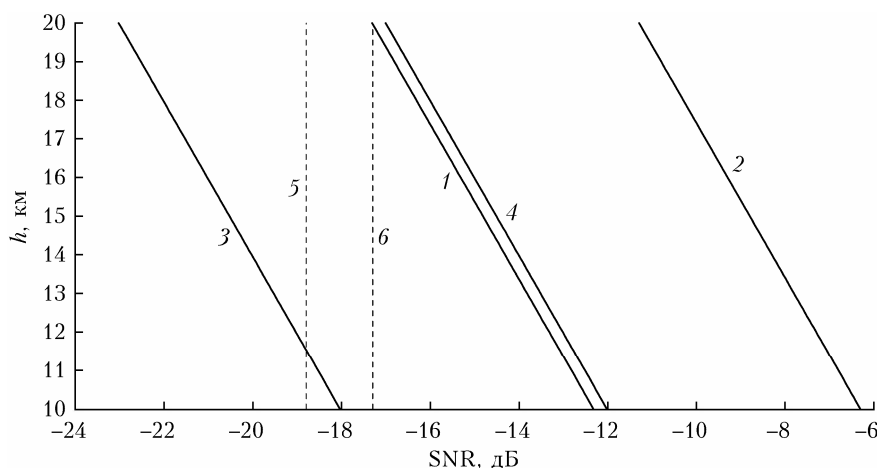


Рис. 2. Высотные профили SNR (сплошные кривые) в случае 1-микронного (кривые 1 и 2) и 2-микронного (кривые 3 и 4) ИКДЛ в окрестности $F = \sim 500$ м с $E_p = 1$ мДж (кривые 1 и 3) и 4 мДж (кривые 2 и 4); пунктирными прямыми указаны $\text{SNR}_{\text{Thr}} = -18,8$ дБ для ИКДЛ с $\lambda = 1$ мкм (линия 5) и $-17,3$ дБ для ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм (линия 6)

Пусть, как и в [6] для лидара наземного базирования, для извлечения информации о скорости и направлении ветра используются данные конически сканирующего ИКДЛ, находящегося на борту самолета и работающего на молекулярном рассеянии. В численном моделировании мы задаем такие же, как и в [6], параметры измерения: угол места $\varphi = 60^\circ$; за одно сканирование (азимутальный угол изменяется с 0 до 354°) имеем $I = 60$ оценок радиальных скоростей под разными азимутальными углами (разрешение по азимуту 6°). При $f_p = 1$ кГц для спектральной аккумуляции используется число посылок зондирующих импульсов в атмосферу $N_a = 10000$, т.е. продолжительность измерения радиальной скорости $\Delta t = N_a/f_p = 10$ с, а при $I = 60$ время одного конического сканирования $T_{\text{scan}} = I\Delta t = 10$ мин. Для таких параметров измерения с помощью численного моделирования в [6] определены: 1) $\text{SNR}_{\text{Thr}} = -18,8$ дБ для ИКДЛ с $\lambda = 1$ мкм и 2) $\text{SNR}_{\text{Thr}} = -17,3$ дБ для ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм (при SNR выше этих порогов лидарная оценка скорости ветра является вполне приемлемой, т.е. погрешность оценки не превышает 2 м/с).

Из рис. 2 видно, что $E_p = 1$ мДж недостаточно для получения достоверной информации о ветре из измерений 2-микронным ИКДЛ в атмосферном слое 10–20 км, в отличие от 1-микронного ИКДЛ. Увеличение E_p в четыре раза решает проблему зондирования ветра 2-микронным ИКДЛ во всем этом слое.

С помощью кривых 1 и 3 (рис. 2) для $\text{SNR}(h)$ мы определили зависимости максимальной высоты измерения скорости ветра $h_{\text{max}}(E_p)$ из равенства

$\text{SNR}(h_{\text{max}}) = \text{SNR}_{\text{Thr}} - 10\lg(E_p)$ (E_p в мДж, SNR в дБ) (рис. 3). Видно, что измерения скорости ветра во всем атмосферном слое 10–20 км будут репрезентативными при условии $E_p \geq 0,71$ мДж для ИКДЛ с $\lambda = 1$ мкм и $E_p \geq 3,74$ мДж для ИКДЛ с $\lambda = 2$ мкм.

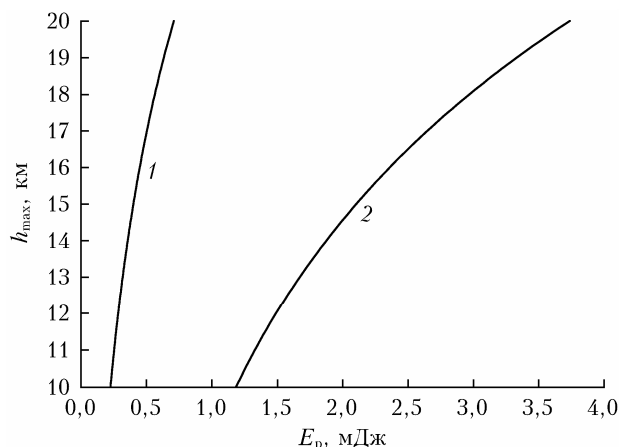


Рис. 3. Зависимости максимальной высоты измерения скорости ветра с помощью ИКДЛ самолетного базирования с $\lambda = 1$ мкм (кривая 1) и 2 мкм (кривая 2) от энергии зондирующего импульса

Сравним возможности использования молекулярного рассеяния для измерения скорости ветра в атмосферном слое 10–20 км ИКДЛ наземного и самолетного базирования. Пользуясь данными рис. 3 и рис. 7 из работы [6], представим $h_{\text{max}}(E_p)$ на рис. 4. Видно, что для репрезентативных измерений скорости ветра в атмосферном слое 10–20 км с помощью ИКДЛ самолетного базирования необходима E_p на два и более порядка меньше, чем при использовании ИКДЛ наземного базирования (меньше в 200–500 и 450–1300 раз в случаях 2- и 1-микронного ИКДЛ соответственно в зависимости от высоты зондирования).

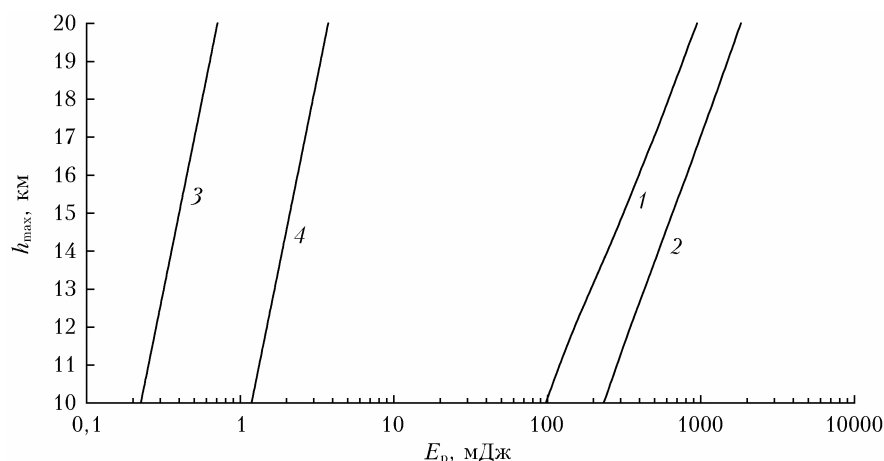


Рис. 4. Зависимости максимальной высоты измерения скорости ветра с помощью ИКДЛ наземного (кривые 1 и 2) и самолётного (кривые 3 и 4) базирования, работающего на $\lambda = 1$ мкм (кривые 1 и 3) и 2 мкм (кривые 2 и 4), с использованием молекулярного рассеяния света

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Заключение

Результаты численного исследования возможностей измерения ветра в атмосферном слое 10–20 км импульсным когерентным доплеровским лидаром, работающим на молекулярном рассеянии света, установленным на борту самолета и использующем фокусировку зондирующего пучка на расстоянии 500 м, указывают на следующее. В отличие от ИКДЛ наземного базирования, имеющиеся на сегодняшний день ИКДЛ (с энергией зондирующего импульса порядка 1–4 мДж и использующие аэрозольное рассеяние) после соответствующей модернизации (добавление канала регистрации молекулярного рассеяния) могут применяться для надежных измерений скорости ветра в атмосферном слое от 10 до 20 км с борта самолета.

Список литературы

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. Однократное рассеяние и теория переноса. М.: Мир, 1981. 280 с.
2. Frehlich R.G., Kavaya M.J. Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 5325–5337.
3. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
4. Spinhine J.D., Chudamani S., Cavanaugh J.F., Buf-ton J.L. Aerosol and cloud backscatter at 1.06, 1.54, and 0.53 μm by airborne hard-target-calibrated Nd:YAG/methane Raman lidar // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 15. P. 3475–3490.
5. Rye B.J. Molecular backscatter heterodyne lidar: A computational evaluation // Appl. Opt. 1998. V. 37, N 27. P. 6321–6328.
6. Смалихо И.Н., Банах В.А. Численное исследование возможностей ветрового зондирования в атмосферном слое 10–20 км когерентным доплеровским лидаром наземного базирования // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 9. С. 722–729; Smalikho I.N., Banakh V.A. Numerical study of possibilities of wind sounding in the atmospheric layer from 10 to 20 km with a ground-based coherent Doppler lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N S1. P. S70–S78. DOI: 10.1134/S1024856023010165.
7. Rahm S. Measurement of a wind field with an airborne continuous-wave lidar // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 581–599.
8. Reitebuch O., Werner Ch., Leike I., Delville P., Flament P.H., Cress A., Engelbart D. Experimental validation of wind profiling performed by the airborne 10 μm heterodyne Doppler lidar WIND // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18, N 8. P. 1331–1344.

I.N. Smalikho, V.A. Banakh. Numerical study of the possibilities of wind sounding in the atmospheric layer from 10 to 20 km by an airborne coherent Doppler lidar.

The possibilities of using molecular scattering to determine the wind speed from measurements by a pulsed coherent Doppler lidar (PCDL) from an aircraft at altitudes from 10 to 20 km are numerically studied. The simulation was carried out for probing radiation focused at 500 m at wavelengths of 1 μm and 2 μm , the aperture diameter of the receiving-transmitting telescope was set equal to 10 cm. It is shown that the threshold SNR in measurements from an aircraft is attained at a pulse energy much lower than when sounding from the Earth. Modern PCDLs with probing pulse energies of 1–4 mJ, after adding a molecular scattering recording channel, can be used for airborne wind measurements at altitudes of 10–20 km.