

УДК 621.396.029.7

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЗАСВЕТКИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПАССИВНОГО ЛИДАРА ПРИ ПРИЁМЕ РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В. И. Григорьевский**

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Россия

Решена задача определения мощности принимаемого рассеянного оптического излучения сторонних лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере Земли, пассивным лазерным локатором (лидаром) в слабозамутнённой прозрачной атмосфере, а также определён радиус действия последнего. В ночных условиях без солнечной засветки радиус действия лидара может составлять более 2300 км при обнаружении пучков с мощностью порядка 100 кВт. При наличии солнечной засветки радиус действия уменьшается на порядок. Для малой мощности стороннего пучка экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются между собой, что даёт основание экстраполировать полученные теоретические результаты на большие мощности сторонних пучков с учётом потерь излучения из-за вторичного рассеяния Рэлея.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с появлением мощных лазерных излучателей киловаттного диапазона в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн возникает задача обнаружения или использования (например, для связи или синхронизации) этого излучения, распространяющегося в атмосфере Земли [1]. При этом его источники могут располагаться в том числе и на летательных аппаратах. В частности, такие мощные пучки излучения возможно обнаружить пассивными лидарами с высокочувствительными приёмниками излучения, например, на основе лавинных фотодиодов [2, 3]. В данных работах было показано, что обратное рассеяние Рэлея в слабозамутнённой атмосфере может создавать значительные помехи при пассивных и активных лидарных измерениях, когда находящийся рядом с приёмником собственный передатчик квазинепрерывного лидара излучает мощный лазерный пучок, причём теоретические оценки этих помех хорошо совпадают с экспериментальными результатами. Также была проведена оценка мощности излучения, принимаемого лидаром в пассивном режиме, когда собственный передатчик лидара выключен, а принимается рассеянное излучение от сторонних мощных источников. Оценки были выполнены для ночных условий в отсутствие солнечной засветки. Было показано, что интенсивные (с мощностью порядка 100 кВт) сторонние пучки могут быть обнаружены лидаром вплоть до расстояний 10 000 км. Однако при этом не учитывалось влияние потерь излучения из-за вторичного рассеяния, а также влияние солнечной засветки на работу фотоприёмника лидара в дневных условиях, когда засветка может создавать дополнительные шумы на фотоприёмнике и тем самым снижать радиус обнаружения и чувствительность пассивного лидара. Используемый ниже подход опирается на линейные процессы распространения лазерного излучения в атмосфере, т. е. не рассматриваются нелинейные эффекты пробоя, разогрева воздуха и т. д. Однако плотности мощности сторонних лазерных источников таковы, что уже возможно воздействие их на плотные объекты, находящиеся на пути луча. Также, поскольку интенсивность рэлеевского рассеяния пропорциональна именно плотности мощности лазерного излучения, возможно его использование и для коге-

* vig248@rambler.ru

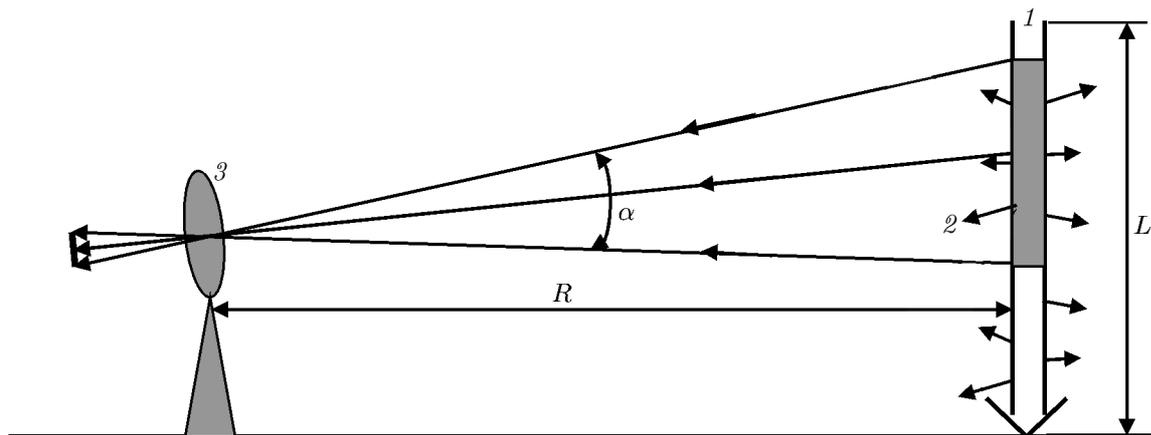


Рис. 1. Геометрия задачи пассивной локации пучка лазерного излучения в отсутствие солнечной засветки: 1 — мощный лазерный пучок, 2 — рассеяние, 3 — пассивный лидар

рентной связи или синхронизации удалённых на значительные расстояния пунктов.

Целью данной работы является уточнение чувствительности и радиуса локации пассивного лидара, обнаруживающего мощные сторонние пучки лазерного излучения в дневных условиях при наличии солнечной засветки и потерь за счёт вторичного рассеяния при распространении света от стороннего луча до лидара в инфракрасном диапазоне длин волн.

1. РЕШЕНИЕ ДЛЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

В случае отсутствия солнечной засветки геометрия задачи локации выглядит следующим образом (см. рис. 1). В поле зрения лидара α попадает лишь часть всего стороннего пучка излучения с протяжённостью L . Лидар находится на расстоянии R от лоцируемого пучка, распространяющегося, например, вертикально, рассеиваясь на молекулах воздуха в атмосфере Земли. Как показано в работах [4, 5], на высотах более 3 км рэлеевское рассеяние в слабозамутнённой атмосфере становится сравнимым с рассеянием Ми, и именно в данном диапазоне высот справедливы полученные ниже результаты. В рассматриваемом приближении также будем учитывать потери излучения на пути от пучка до лидара из-за вторичного рассеяния Рэлея, т. к. при расстояниях более $100 \div 1000$ км эти потери становятся существенны.

Оценим сначала общее рассеяние света на всей длине L пучка. Для оценок воспользуемся тем, что рассеяние в объёме луча определяется количеством молекул N_{tot} , находящихся в этом объёме:

$$N_{tot} = \pi r^2 L N_{av}, \tag{1}$$

где $L \sim 25$ км — эффективный рассеивающий слой атмосферы, πr^2 — площадь сечения стороннего пучка света, $N_{av} = 0,335N$ — среднее по высоте число Лошмидта в столбе воздуха в единице объёма, определяемое из барометрической формулы

$$N_{cp} = \frac{1}{25} \int_0^{25} N \exp(-z[\text{км}]/8,9) dz = 0,335N. \tag{2}$$

Здесь толщина эффективного слоя атмосферы с заметным давлением, по которому ведётся интегрирование, составляет величину около 25 км, а число Лошмидта у поверхности Земли равно $N = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Мощность общего рассеяния Рэлея по всем направлениям на длине луча $L = 25$ км запишется в виде

$$P_{\text{scatt tot}} = 4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \pi r^2 L N_{\text{av}}. \quad (3)$$

Здесь $4\pi R^2 P_0 / (\pi r^2) [9\pi^2 V^2 / (\lambda^4 R^2)]$ — мощность света, рассеиваемая одной молекулой воздуха по всем направлениям в телесном угле 4π , P_0 — мощность стороннего пучка света, $P_0 / (\pi r^2)$ — его интенсивность (плотность мощности), r — средний радиус стороннего пучка света, $\pi r^2 L N_{\text{av}}$ — общее число рассеивающих молекул на длине L , R — расстояние от лидара до стороннего пучка, V — объём молекулы воздуха (кислорода, азота), λ — длина волны излучения. В формуле (3) сделано следующее допущение: индикатриса рассеяния [6] одиночной молекулы для закона Рэлея изотропна и пропорциональна величине, стоящей в круглых скобках формулы (3). Интерпретация данной формулы заключается в суммировании величин мощностей излучения, рассеянного на всех молекулах воздуха, которые находятся на пути пучка. Из формулы также видно, что в данном приближении результат расчёта не зависит от радиуса пучка r и расстояния до лидара R , поскольку сокращаются величины πr^2 и R^2 в числителе и знаменателе формулы. Вычисляя (3) с значениями радиуса молекулы воздуха 0,16 нм, длиной волны излучения $\lambda \sim 1,65$ мкм и $L = 25$ км, получаем $P_{\text{scatt tot}} \approx 0,01 P_0$. Проведём оценку части этой мощности, попадающей в поле зрения α пассивного лидара. Задача сводится к возможности измерения части мощности, которая составляет величину $R\alpha/L$ от $0,01 P_0$, где R — расстояние от лоцируемого луча до лидара (радиус обзора; см. рис. 1). Пусть, например, приёмный объектив имеет поле зрения $\alpha = 0,004$, а радиус его входного зрачка равен $A = 0,25$ м. Считая, что поле зрения объектива лидара перехватывает диаметр всего стороннего пучка, можно оценить мощность рассеянного излучения, попадающую в приёмный объектив в телесном угле $\pi A^2 / (4\pi R^2)$, умножая этот угол на величину $R\alpha/L$ и на правую часть уравнения (3):

$$P_{\text{lid}} = \alpha \pi A^2 P_0 (9\pi^2 V^2 / \lambda^4) N_{\text{av}} / R. \quad (4)$$

При больших радиусах обнаружения необходимо учитывать потери за счёт вторичного рассеяния между лидаром и сторонним пучком. При оценке этих потерь в качестве коэффициента рассеяния k правомерно принять значение, определяемое из формулы (3). Действительно, по закону Бугера потери на рассеяние, даваемые формулой (3), можно представить в виде разности первоначальной и конечной мощности излучения при прохождении расстояния L :

$$P_{\text{scat tot}} = 4\pi P_0 \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4} \right) L N_{\text{av}} = P_0 - P_0 \exp(-kL) \approx P_0 kL. \quad (5)$$

Здесь в первом приближении экспонента была разложена в ряд и величина k , как видно из (5), равна $k = 4\pi(9\pi^2 V^2 / \lambda^4) N_{\text{av}}$, т. е. в рассматриваемом случае $k = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$. Таким образом, мощность P_{lid}^1 , попадающая в лидар с учётом вторичного рассеяния, запишется в виде

$$P_{\text{lid}}^1 = \alpha \pi A^2 P_0 (9\pi^2 V^2 / \lambda^4) (N_{\text{av}} / R) \exp(-kR). \quad (6)$$

На рис. 2 изображена зависимость P_{lid}^1 , вычисленная по формуле (6), от величины P_0 при радиусе обзора $R = 20$ км. Из графика видно, что излучение с мощностью порядка 20 Вт можно обнаружить современными высокочувствительными фотоприёмниками (например, чувствительными лавинными фотодиодами [7]) с порогом обнаружения (noise equivalent power) $\text{NEP} \sim 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ в полосе частот 1 Гц. На том же рисунке приведена зависимость радиуса обзора R от P_0 при лоцируемой мощности в 10 раз больше, чем порог обнаружения, т. е. при мощности

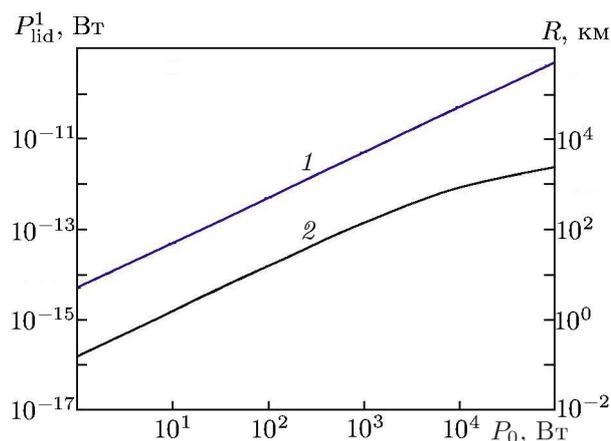


Рис. 2. Линия 1 — зависимость мощности рассеянного излучения, принимаемого пассивным лидаром, от мощности стороннего пучка P_0 (левая шкала), 2 — зависимость радиуса обзора R от P_0 при принимаемой мощности $3,2 \cdot 10^{-13}$ Вт (правая шкала)

условиях эксперименте, выполненном при геометрии рис. 1 для слабобрасходящегося стороннего пучка, оно составило около 30 м. Было сделано предположение, что это несовпадение связано с влиянием солнечной засветки фотоприёмника. Этот фактор уменьшает соотношение сигнал/шум, а следовательно, и радиус обзора.

около $3,2 \cdot 10^{-13}$ Вт (отношение сигнал/шум составляет величину порядка 10). Видно, что зависимость радиуса обзора отклоняется от линейной при больших R за счёт вторичного рассеяния. Но это значение R может достигать величины около 2350 км при лоцируемой мощности порядка 100 кВт, что является значительной величиной при локации мощного излучения, распространяющегося в атмосфере. Однако, как было упомянуто ранее, данные оценки не учитывают фоновую засветку фотоприёмника дневным светом. При экспериментальном определении радиуса обнаружения рассеянного излучения в дневных условиях на небольших расстояниях оказалось, что он меньше примерно на порядок, чем предсказывают вычисления. Так, на рис. 2 видно, что при мощности стороннего пучка 2 Вт расстояние обнаружения должно составлять около 300 метров, однако в поставленном в дневных

2. РЕШЕНИЕ ДЛЯ ДНЕВНОЙ АТМОСФЕРЫ С УЧЁТОМ РАССЕЯННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЗАСВЕТКИ, ПОПАДАЮЩЕЙ В ЛИДАР

Оценим величину фоновой засветки, попадающую в лидар в дневных условиях. Геометрия лидарных измерений с засветкой приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что, наряду с излучением от мощного стороннего пучка, в этом случае пассивный лидар принимает также и рассеянное излучение от засветки, находящейся в его поле зрения. Как известно [8], плотность мощности солнечной засветки составляет примерно 1 кВт/м², поэтому плотность мощности рэлеевского рассеяния засветки $dP_{\text{light scat}}$ от элементарного рассеивающего объёма dV (параллелепипеда) на расстоянии R запишется по аналогии с (3) следующим образом:

$$dP_{\text{light scat}} = P_{\text{back}} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 dR N_{\text{av}}. \tag{7}$$

Здесь $(\alpha R)^2 dR$ — элементарный объём с толщиной dR и основанием αR , $P_{\text{back}} \sim 1$ кВт/м² — плотность мощности солнечной засветки, остальные обозначения аналогичны обозначениям для формулы (3). Мощность рассеянной солнечной засветки, попадающей в лидар от элементарного объёма dV , пропорциональна площади приёмного объектива, т. е.

$$dP_{\text{light scat}} = \pi A^2 P_{\text{back}} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 dR N_{\text{av}}. \tag{8}$$

Общая мощность рассеянной солнечной засветки от пирамиды с основанием αR и рёбрами R равна интегралу от рассеяния на всех элементарных объёмах, попадающих в поле зрения лидара,

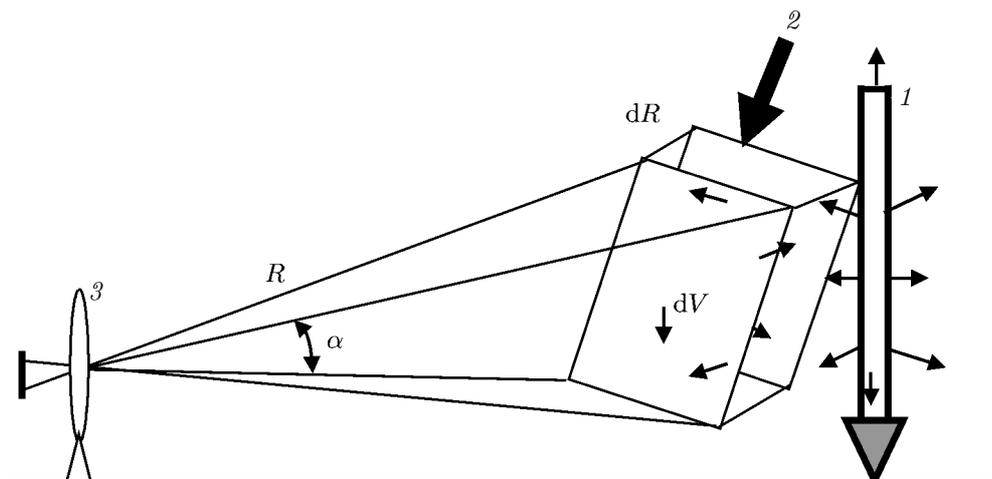


Рис. 3. Геометрия лидарных измерений в дневных условиях с солнечной засветкой: 1 — сторонний пучок, 2 — засветка, 3 — лидар

т. е.

$$P_{\text{light scat}} = \int_0^R \pi A^2 P_{\text{back}} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 N_{\text{av}} dR. \quad (9)$$

Интегрируя, получаем результирующую формулу для рассеянной солнечной засветки, попадающей в поле зрения лидара:

$$P_{\text{light scat}} = \pi A^2 P_{\text{back}} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4} \right) \alpha^2 R N_{\text{av}}. \quad (10)$$

Видно, что засветка пропорциональна квадрату угла поля зрения лидара и расстоянию лоцирования R . Проводя вычисления по формуле (8) для $A = 0,25$ м, $\alpha = 0,004$, расстояния $R \sim 100$ км с заметной плотностью атмосферы и остальных числовых значений, приведённых выше, получаем $P_{\text{light scat}} \approx 10^{-6}$ Вт при отсутствии оптического фильтра и $P_{\text{light scat}} = 0,25 \cdot 10^{-8}$ Вт в случае использования в фотоприёмнике лидара интерференционного оптического фильтра с шириной полосы пропускания около 10 нм, ослабляющего солнечную засветку примерно в 400 раз. Для дальнейших оценок определим влияние солнечной засветки на отношение сигнал/шум SNR (signal/noise ratio) для лидарных измерений мощности рассеянного излучения. Для этих оценок воспользуемся формулой из [9]:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{lid}}^1 e \eta k_i / (\hbar \omega)}{\{2e^2 \Delta f F k_i^2 [P_{\text{light scat}} \eta / (\hbar \omega) + I_d / e]\}^{1/2}}, \quad (11)$$

где P_{lid}^1 — мощность полезного принимаемого лидаром сигнала, \hbar — постоянная Планка, ω — частота света, $\eta = 0,75$ — квантовая эффективность фотоприёмника, $P_{\text{light scat}} \sim 10^{-6}$ Вт — мощность засветки от фонового излучения на фотоприёмнике, $I_d \sim 8$ нА — темновой ток фотоприёмника, $\Delta f = 1$ Гц — полоса частот фотоприёмника, $F \sim 2$ — дополнительный шум-фактор, обусловленный внутренним усилением фотоприёмника, e — элементарный заряд, $k_i \sim 20$ — внутренний коэффициент усилителя фотоприёмника (лавинного фотодиода). Интерпретация формулы (11) следующая: в числителе стоит величина, пропорциональная току полезного сигнала, а в знаменателе первый и второй члены пропорциональны шумам тока фоновой засветки и шумам

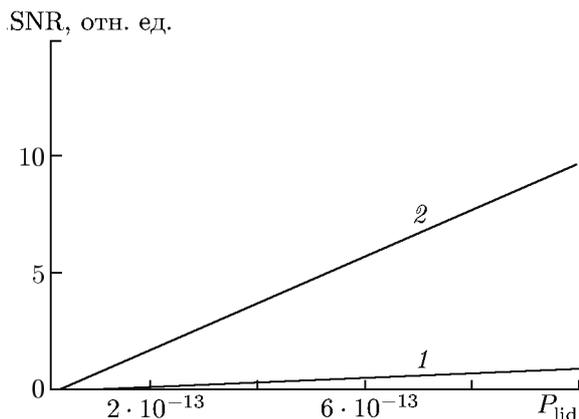


Рис. 4. Отношение сигнал/шум для лидарных измерений при наличии (1) и в отсутствии (2) солнечной засветки

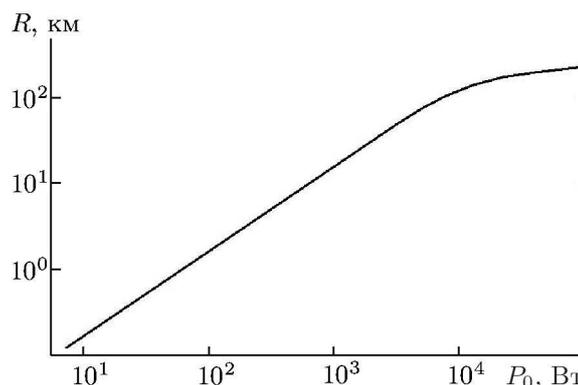


Рис. 5. Радиус обнаружения лидара в зависимости от мощности стороннего пучка P_0 при мощности принимаемого лидаром излучения $3,2 \cdot 10^{-13}$ Вт и наличии солнечной засветки

темнового тока соответственно — основным источникам шума для лавинных фотодиодов. На рис. 4 приведены графики зависимости отношения сигнал/шум от P_{lid} при наличии и отсутствии солнечной засветки, вычисленное с помощью формул (6), (10) и (11). Видно, что отношение сигнал/шум в дневных условиях уменьшается примерно в 10 раз по сравнению с ночными условиями без засветки. Отсюда следует, что расстояние локации в дневных условиях будет в 10 раз меньше, как показано на рис. 5. Данные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными при небольшой мощности стороннего пучка. Из рисунка видно, что в дневных условиях сторонние пучки с мощностью около 100 Вт можно обнаруживать на расстояниях порядка 2 км, а с мощностью 100 кВт — на расстояниях около 235 км при мощности принимаемого лидаром излучения $3,2 \cdot 10^{-13}$ Вт. Однако если известна длина волны обнаруживаемого излучения, то возможно использование интерференционного фильтра, ослабляющего солнечную засветку вплоть до пренебрежимо малой величины; радиус обнаружения в этом случае будет на порядок больше (кривая 2 на рис. 2). Необходимо отметить, что рассеяние излучения увеличивается обратно пропорционально четвёртой степени длины волны, однако, как показывают оценки, на более коротких длинах волн увеличиваются также и потери на трассе между лидаром и сторонним пучком из-за вторичного рэлеевского рассеяния. Эти потери необходимо учитывать для получения корректного результата для радиуса обнаружения лидара и принимаемой им мощности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённый анализ и предложенная модель в определённой степени адекватно описывают величину рэлеевского рассеяния мощного лидарного излучения, распространяющегося в атмосфере Земли. Конечно, модель обладает существенными недостатками. В частности, не учитывается ослабление из-за рассеяния солнечной засветки на лидарной трассе и её ослабление при прохождении слоя атмосферы. Не учитывается также изменение коэффициента рассеяния с высотой, а берётся его среднее значение. Это делает модель не совсем точной, так что она может дать только приближённые значения искомых величин. Для более точных оценок необходимо тщательно учитывать параметры атмосферы, метеоданные, возможно значительно уточнить приведённые выше формулы, учтя в них, например, высоту расположения лидара и направление его диаграммы направленности. В рамках представленной модели рассматриваемый пассивный лидар может обнаруживать стороннее излучение в слабозамутнённой ночной атмо-

сфере в радиусе обзора около 2300 км в зависимости от его мощности. В дневных условиях с интенсивной солнечной засветкой расстояние обнаружения уменьшается примерно на порядок. Однако при известной длине волны излучения возможно применение оптического узкополосного фильтра, который может снизить влияние солнечной засветки до пренебрежимо малой величины. Приведённые вычисления показывают также, что возможно не только дальнейшее обнаружение инфракрасного излучения, но и загоризонтная оптическая связь, основанная на рассеянии Рэлея между удалёнными на значительные расстояния пунктами, не находящимися в зоне прямой видимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.k3pgp.org/laserscatter.htm>.
2. Григорьевский В. И., Садовников В. П., Тезадов Я. А и др. // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 9. С. 895.
3. Grigorievsky V. I., Sadovnikov V. P., Elbakidse A. V., Tesadov Y. A. // 2018 Int. Conf. Laser Opt. 4–8 June 2018, St. Petersburg. P. 292.
4. Yu H., Chin M., Winker D. M., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. D00H30.
5. Зуев В. В. Лидарный контроль атмосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 308 с.
6. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Основы теоретической атмосферной оптики. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский ун-т, 2007. 152 с.
7. <http://www.lasercomponents.com/>.
8. <https://zdamsam.ru/a75798.html>.
9. Батраков С. А. Лазерные измерительные системы. М.: Радио и связь, 1981. 147 с.

Поступила в редакцию 19 ноября 2018 г.; принята в печать 28 февраля 2019 г.

THE EFFECT OF SOLAR ILLUMINATION ON THE SENSITIVITY OF A PASSIVE LIDAR FOR RECEPTION OF SCATTERED LASER RADIATION

V. I. Grigorievskii

We solve the problem of determining power of received scattered optical radiation from the extraneous laser beams propagating in the Earth's atmosphere by passive laser locator (lidar) in a weakly clouded transparent atmosphere and also determine the operation radius of the latter. Under the night conditions without solar illumination, the lidar operation radius can exceed 2300 km when determining the beams with powers about 100 kW. In the presence of solar illumination, the operation radius decreases by an order of magnitude. For a small power of extraneous beam, the experimental and theoretical data are in good agreement, which allows one to extrapolate the obtained theoretical results to larger powers of extraneous beams with allowance for the radiation loss because of the secondary Rayleigh scatter.