

УДК 621.396.029.7

ОБНАРУЖЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ЕГО РЕЛЕЕВСКОМУ РАССЕЙНИЮ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В. И. Григорьевский

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2018 г.

Аннотация. В работе решена задача определения величины принимаемой рассеянной оптической мощности сторонних слаборасходящихся лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере Земли, пассивным лазерным локатором (лидаром) в слабозамутненной прозрачной атмосфере, а также определен радиус действия лидара. В ночных условиях без солнечной засветки радиус действия лидара может составлять более 10000 км при обнаружении пучков с мощностью порядка 100 кВт. При наличии солнечной засветки радиус действия уменьшается на порядок. Экспериментальные и теоретические данные согласуются между собой, что подтверждает правильность теоретического подхода к решаемой задаче.

Ключевые слова: лидар, рассеяние Релея, атмосфера, солнечная засветка.

Abstract. The paper solved the problem of determining the amount of received scattered optical power of third-party weakly diverging laser beams propagating in the Earth's atmosphere by a passive laser locator (lidar) in a transparent atmosphere, and the radius of the lidar action was determined. At night, without sunlight, the lidar range can be more than 10,000 km when detecting beams with a power of about 100 kW in the 1 Hz frequency band. The lidar photodetector is made on the basis of an avalanche photodiode with a detecting ability (NEP) equal to $3.2 \cdot 10^{-14}$. In the presence of solar illumination, the range is reduced by an order of magnitude due to the additional noise of the illumination falling on the avalanche photodiode. However, if a wavelength of laser radiation is wellnoun, it is possible to use a narrow-band interference filter in front of the photodetector. In this case, the influence of solar illumination can be almost completely eliminated and the range of

the lidar increases. Rayleigh scattering detection in the weakly turbid atmosphere of the Earth can also be used for long-distance communication or synchronization of remote sites over long distances. Experimental and theoretical data are consistent with each other, which confirms the correctness of the theoretical approach to the problem being solved.

Keywords: lidar, Rayleigh scattering, atmosphere, sunlight

1. Введение

В связи с появлением мощных лазерных излучателей киловаттного диапазона в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн возникает задача обнаружения или использования (например, для связи или синхронизации), этого излучения, распространяющегося в атмосфере Земли, которое может исходить, в том числе от источников, располагающихся на летательных аппаратах. В частности, такие мощные пучки излучения возможно обнаружить пассивными лидарами с высокочувствительными приемниками излучения, например на основе лавинных фотодиодов [1,2]. В данных работах было показано, что обратное Релеевское рассеяние в слабозамутненной атмосфере может создавать значительные помехи при пассивных и активных лидарных измерениях, когда находящийся рядом с приемником собственный передатчик квазинепрерывного лидара излучает мощный лазерный пучок. Причем теоретические оценки этих помех хорошо совпадают с экспериментальными результатами. Также была проведена оценка мощности, принимаемой лидаром в пассивном режиме, когда собственный передатчик лидара выключен, а принимается рассеянное излучение от сторонних мощных источников. Оценки были проведены для ночных условий в отсутствие солнечной засветки. Было показано, что мощные (~100 кВт) сторонние пучки могут быть обнаружены лидаром вплоть до расстояний ~10000 км. Однако, при этом не учитывалось влияние солнечной засветки на работу фотоприемника лидара, работающего в дневных условиях, когда засветка может создавать дополнительные шумы на фотоприемнике и снижать радиус

обнаружения и чувствительность пассивного лидара.

Целью данной работы является уточнение чувствительности и радиуса обнаружения пассивного лидара, обнаруживающего мощные сторонние пучки лазерного излучения в дневных условиях при наличии солнечной засветки в инфракрасном диапазоне длин волн.

2. Решение для ночной атмосферы

В случае отсутствия солнечной засветки геометрия задачи локации выглядит следующим образом, рис.1.

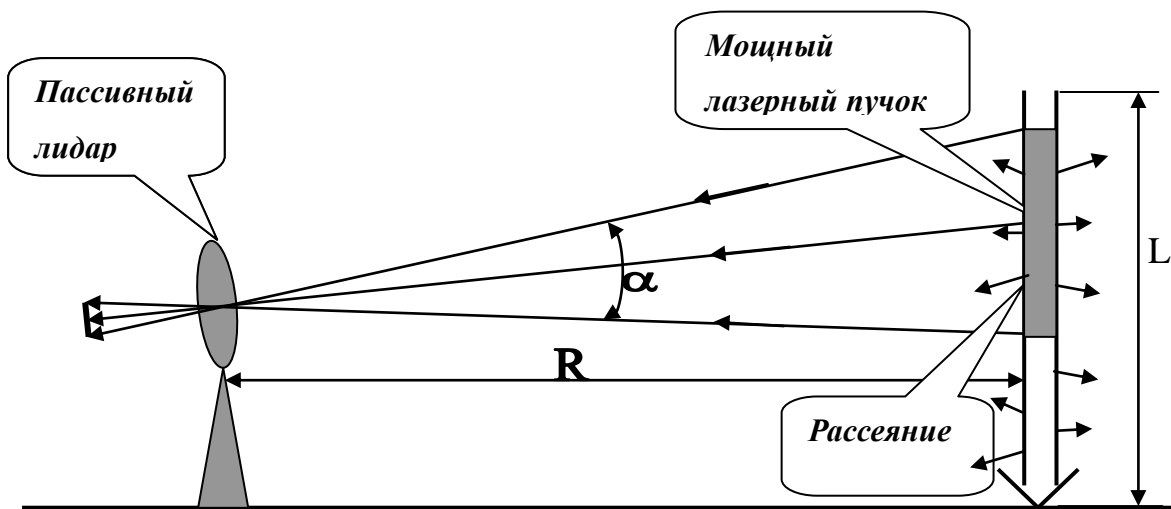


Рис.1 Геометрия задачи пассивной локации пучка лазерного излучения в отсутствие солнечной засветки

В поле зрения лидара α попадает лишь часть всего стороннего пучка излучения протяженностью L . Лидар находится на расстоянии R от лоцируемого пучка, распространяющегося, например, вертикально, рассеиваясь на молекулах воздуха в атмосфере Земли. Оценим сначала общее рассеяние света на всей длине L пучка. Для оценок воспользуемся тем, что рассеяние Релея в объеме луча определяется количеством молекул $N_{общ}$, находящихся в этом объеме:

$$N_{общ} = \pi r^2 L N_{ср} \quad (1)$$

где $L \sim 25$ км – эффективный рассеивающий слой атмосферы, πr^2 – площадь сечения стороннего пучка света, $N_{cp} = 0.335N$ – среднее по высоте число Лошмидта в столбе воздуха в единице объема, определяемое из барометрической формулы:

$$N_{cp} = \frac{1}{25} \int_0^{25} N \exp(-z/8.9) dz = 0.335N \quad (2)$$

Здесь эффективный слой атмосферы с заметным давлением, по которому ведется интегрирование, составляет величину ~ 25 км, а число Лошмидта у поверхности Земли равно $N=2.68 \cdot 10^{25}$ $1/м^3$.

Мощность общего рассеяния Релея по всем направлениям на длине луча $L=25$ километров запишется в виде:

$$P_{расс_общ} = 4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \pi r^2 L N_{cp} \quad (3)$$

Здесь $4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right)$ – мощность света, рассеиваемая одной молекулой воздуха по всем направлениям в телесном угле 4π , P_0 – мощность стороннего пучка света, $\frac{P_0}{\pi r^2}$ – его интенсивность (плотность мощности), r – средний радиус стороннего пучка света, $\pi r^2 L N_{cp}$ – общее число рассеивающих молекул на длине L , R – расстояние от лидача до стороннего пучка, V – объем молекулы воздуха (кислорода, азота), λ – длина волны излучения. В формуле (3) сделано следующее допущение: индикатриса рассеяния [3] одиночной молекулы для закона Релея изотропна и пропорциональна величине, стоящей в круглых скобках формулы (3). Интерпретация данной формулы заключается в суммировании рассеянных величин мощности света от всех молекул воздуха, находящихся на пути пучка. Из формулы также видно, что в данном приближении результат расчета не зависит от радиуса пучка r и радиуса наблюдения R , поскольку сокращаются величины πr^2 и R^2 в числителе и знаменателе формулы. Вычисляя выражение (3) с численными значениями

радиуса молекулы воздуха ~ 0.16 нм, длиной волны излучения $\lambda \sim 1,65$ мкм и $L=25$ км, получаем $P_{\text{расс_общ}} \sim 0.01P_0$ Вт. Проведем 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 $0.01P_0$, где R - расстояние от лоцируемого луча до лидара (радиус обзора), рис.1. Пусть, например, приемный объектив имеет поле зрения $\alpha=0.004$, а радиус его входного зрачка $A=0.25$ м. Считая, что поле зрения объектива лидара перехватывает диаметр всего стороннего пучка, можно оценить мощность рассеянного излучения $P_{\text{лид}}$, попадающую в приемный 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):

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

На рис.2. изображена зависимость обнаруживаемой рассеянной мощности $P_{\text{лид}}$, вычисленной по формуле (4), от величины P_0 при радиусе обзора $R=20$ км, а также зависимость радиуса обзора R от P_0 при принимаемой лидаром мощности $6.4 \cdot 10^{-13}$ Вт. Из графика видно, что при радиусе обзора 20 км мощность излучения ~ 20 Вт можно обнаружить современными высокочувствительными фотоприемниками (например, чувствительными лавинными фотодиодами типа IAG200) с порогом обнаружения (noise equivalent power) $NEP \sim 3.2 \cdot 10^{-14}$ Вт/ (Гц)^{1/2} в полосе частот 1 Гц. На том же рисунке (правая шкала) приведена зависимость радиуса обзора R от P_0 при лоцируемой мощности в ~ 20 раз больше чем порог обнаружения, то есть при $\sim 6,4 \cdot 10^{-13}$ Вт (сигнал/шум ~ 20). Видно, что радиус обзора может достигать величины ~ 10000 км при лоцируемой мощности ~ 100000 Вт и это расстояние обнаружения является значительной величиной при локации мощного излучения, распространяющегося в атмосфере. Однако, как было упомянуто ранее, данные оценки не учитывают фоновую засветку фотоприемника дневным светом.

При экспериментальном определении радиуса обнаружения рассеянного

излучения в дневных условиях оказалось, что он меньше примерно на порядок, чем предсказывают теоретические вычисления. Было сделано, предположение, что это несовпадение связано с влиянием солнечной засветки на фотоприемник. Засветка фотоприемника уменьшает соотношение сигнал/шум а, следовательно, и радиус обзора.

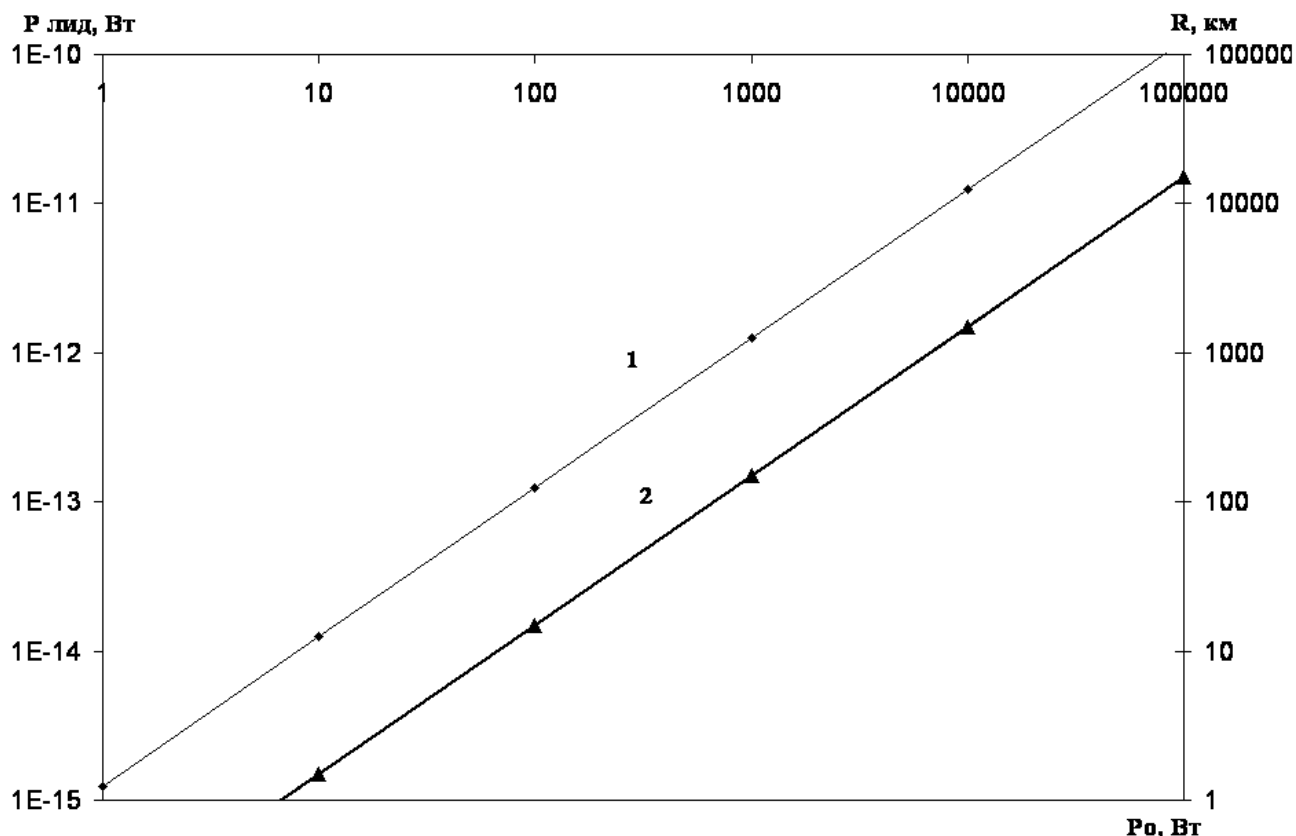


Рис.2 1-зависимость рассеянной мощности, принимаемой пассивным лидаром, от величины мощности стороннего пучка P_0 (левая шкала), 2 - зависимость радиуса обзора R от P_0 при принимаемой мощности $6.4 \cdot 10^{-13}$ Вт (правая шкала)

3. Решение для дневной атмосферы с учетом рассеяния 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 мощным сторонним пучком в этом случае пассивный лидар принимает также и рассеянное излучение от засветки, находящейся в поле зрения лидара.

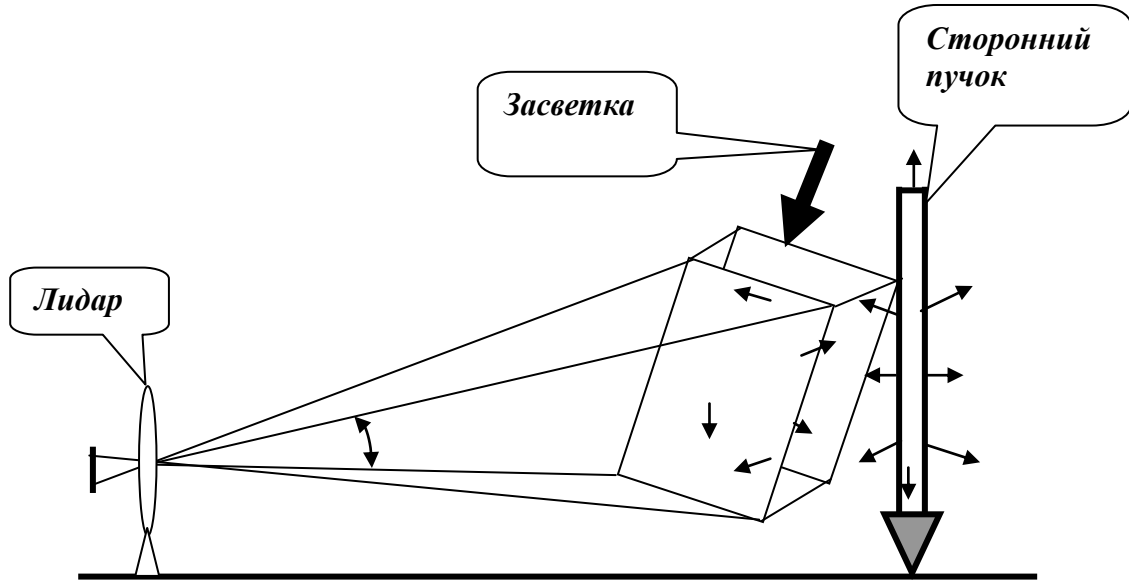


Рис.3 – Геометрия лидарных измерений в дневных условиях с солнечной засветкой

Как известно, плотность солнечной засветки составляет примерно 1 кВт/м^2 , поэтому плотность мощности Релеевского рассеяния засветки $d(P_{\text{расс_засв}})$ от элементарного рассеивающего объема dV (параллелепипеда) на расстоянии R запишется по аналогии с (3) следующим образом:

$$d(P_{\text{расс_засв}}) = P_{\phi} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 dR N_{\text{ср}} \quad (5)$$

Здесь $(\alpha R)^2 dR$ - объем элементарного объема толщиной dR и основанием αR , P_{ϕ} - плотность фона солнечной засветки $\sim 1 \text{ кВт/м}^2$, остальные обозначения аналогичны обозначениям для формулы (3). Мощность рассеянной солнечной засветки, попадающей в лидар от элементарного объема dV , пропорциональна площади приемного объектива, то есть

$$d(P_{\text{расс_засв}}) = \pi A^2 P_{\phi} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 dR N_{\text{ср}} \quad (6)$$

Общая мощность рассеянной солнечной засветки от пирамиды с основанием αR и ребрами R будет равна интегралу от рассеяния на всех элементарных объемах, попадающих в поле зрения лидара, то есть:

$$P_{\text{расс_засв}} = \int_0^R \pi A^2 P_{\phi} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) (\alpha R)^2 N_{\text{ср}} dR \quad (7)$$

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

$$P_{\text{расс_засв}} = \pi A^2 P_{\phi} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4} \right) \alpha^2 R N_{\text{ср}} \quad (8)$$

Видно, что засветка пропорциональна квадрату угла поля зрения лидара и расстоянию лоцирования R. Проводя вычисления по формуле (8) для A=0.25 м, $\alpha=0.004$, для расстояния R с заметной плотностью атмосферы ~100 км и остальных числовых значений, приведенных выше, получаем $P_{\text{расс_засв}} \sim 10^{-6}$ Вт при отсутствии оптического фильтра и $P_{\text{расс_засв}} = 0.25 \cdot 10^{-8}$ Вт в случае использования в фотоприемнике лидара интерференционного оптического фильтра с шириной полосы пропускания ~10 нм, ослабляющего солнечную засветку примерно в 400 раз. Для дальнейших оценок определим влияние солнечной засветки на соотношение сигнал/шум для лидарных измерений рассеянной мощности. Для этих оценок воспользуемся формулой из [4]:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{\text{лид}} e \eta k_i / (\hbar \omega)}{\left[2e^2 \Delta f F k_i^2 (P_{\text{расс_засв}} \eta / (\hbar \omega) + I_T / e) \right]^{1/2}} \quad (9)$$

где $P_{\text{лид}}$ – мощность полезного принимаемого лидаром сигнала, \hbar – постоянная Планка, ω – частота света, $\eta = 0.75$ квантовая эффективность фотоприемника, $P_{\text{расс_засв}} \sim 10^{-6}$ Вт – мощность засветки от фонового излучения на фотоприемнике, $I_T \sim 8$ нА – темновой ток фотоприемника, $\Delta f = 1$ Гц – полоса частот фотоприемника, $F \sim 2$ – дополнительный шум-фактор, обусловленный внутренним усилением фотоприемника, e – заряд электрона, $k_i \sim 20$ внутренний коэффициент усилителя фотоприемника (лавинного фотодиода). Интерпретация формулы (9): в числителе стоит величина пропорциональная току полезного сигнала, а в знаменателе первый и второй члены пропорциональны соответственно, шумам тока фоновой засветки и шумам темнового тока –

основным источникам шума для лавинных фотодиодов. На рис.4 приведено соотношение сигнал/шум при наличии и отсутствии солнечной засветки, вычисленное с помощью формул (4), (8) и (9).

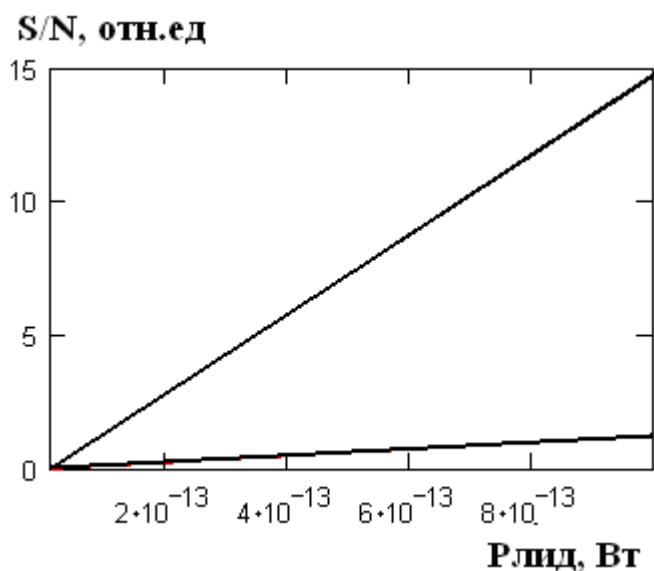


Рис.4 1-соотношение сигнал/шум при наличии солнечной засветки, 2-при отсутствии засветки

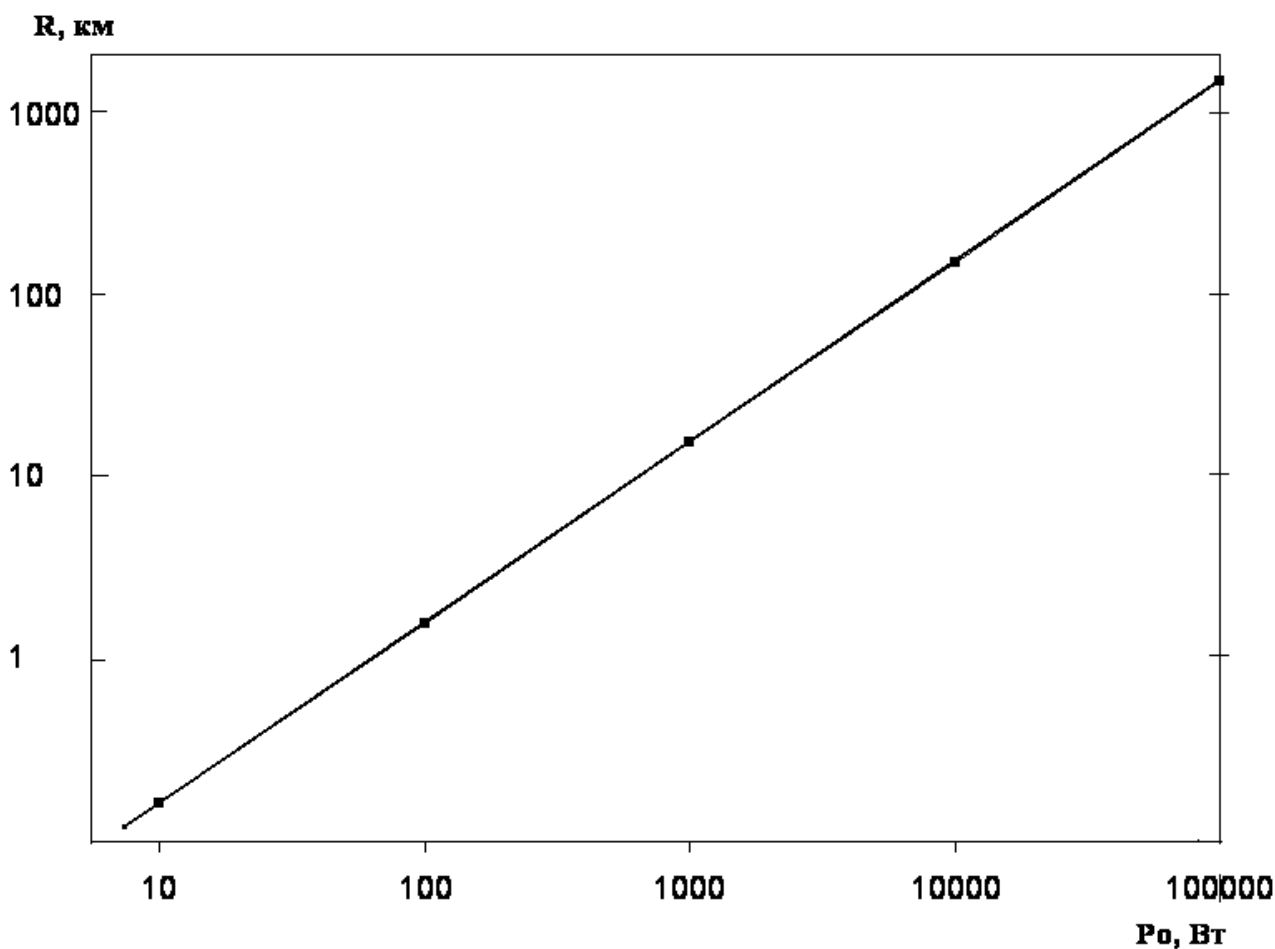


Рис.5 – Радиус обнаружения лидара при наличии солнечной засветки

Видно, что соотношение 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 графике, рис. 5, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Из рисунка следует, что в дневных условиях сторонние пучки мощностью ~ 100 Вт можно обнаруживать на расстояниях порядка 2 км, а мощностью ~ 100 кВт - на расстояниях ~ 2000 км. 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 и определяться прямой 2 на рис. 2.

4. Заключение

Таким образом, проведенный анализ достаточно адекватно описывает величину Релеевского рассеяния мощного лазерного излучения, распространяющегося в атмосфере Земли. Пассивный лидар может обнаруживать такое излучение в слабозамутненной ночной атмосфере в радиусе обзора $\sim 1-10000$ км в зависимости от его мощности. В дневных условиях с 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. Приведенные вычисления показывают также, что возможно не только дальнейшее обнаружение инфракрасного излучения, но и загоризонтная оптическая связь, основанная на рассеянии Релея между удаленными на значительные расстояния пунктами, не находящимися в зоне прямой видимости.

Литература

1. V.I. Grigor'evskii, V.P.Sadovnikov, Y.A. Tezadov, A.V. Elbakidze. Scattering of Laser Radiation in the Earth's Atmosphere and Its Influence on the Operation of

Quasi-Continuous Lidar. *Journal of communication technology and electronics*, 2018, Vol. 63, No.9, pp. 961-964. DOI: [10.1134/S1064226918090073](https://doi.org/10.1134/S1064226918090073).

2. V.I.Grigorievsky, V.P.Sadovnikov, A.V.Elbakidse , Y.A.Tesadov. Passive detection of powerful laser radiation in the Earth's atmosphere. *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)*, 4-8 June 2018, p. 77. DOI: [10.1109/LO.2018.8435743](https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435743)
Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435743>

3. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. *Основы теоретической атмосферной оптики*. С-Петербург, С-Петербургский университет, 2007.152 с.

4. Батраков С.А. *Лазерные измерительные системы*. М., Радио и связь, 1981. 147 с.

Для цитирования:

В. И. Григорьевский. Обнаружение инфракрасного лазерного излучения по его Релеевскому рассеянию в атмосфере Земли. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/12/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.12