

УДК 621.396.029.7

Рассеяние мощного лазерного излучения в атмосфере Земли и его влияние на работу активных и пассивных лидаров

© 2019 г. **В. И. Григорьевский, канд. физ.-мат. наук; Я. А. Тезадов, аспирант**

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

E-mail: vig248@ire216.msk.su, vig248@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.09.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-02-36-40

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования величины обратного рассеяния света в слабозамутнённой атмосфере при испытании лидара в наземных условиях, работающего в непрерывном или квазинепрерывном режиме, когда невозможно провести стробирование и устранить влияние обратного рассеяния света в атмосфере на принимаемый лидаром сигнал. Проведённые теоретические расчёты величины обратного рассеяния на горизонтальных трассах совпадают с результатами проведённого в наземных условиях эксперимента. Небольшое расхождение теоретических и экспериментальных данных объясняется пасмурной погодой и наличием влаги в атмосфере. Разнесение приёмника и передатчика на 25 см друг от друга позволило уменьшить обратное рассеяние до величины шумов фотоприёмника. На основе полученных экспериментальных и теоретических результатов обсуждается возможность обнаружения мощного оптического излучения пассивными лидарами.

Ключевые слова: лидар, обратное рассеяние, атмосфера, индикатриса, атмосфера, оптический передатчик, приёмник.

Коды OCIS: 280.0280, 120.0120.

При испытаниях и калибровках лидаров для дистанционного зондирования Земли, работающих в непрерывном или квазинепрерывном режиме в наземных условиях, когда приёмник и передатчик находятся рядом, возникает нежелательное обратное рассеяние от молекул воздуха, находящихся вблизи приёмопередатчика [1–3]. Это рассеяние при нестабильной атмосфере может создавать изменчивые дополнительные шумы и наводки, искажающие результаты измерений. В отличие от импульсных лидаров, когда стробирование входящих на фотоприёмник коротких импульсов света может полностью устранить обратное атмосферное отражение от близлежащих слоёв атмосферы, в квазинепрерывных лидарах возможность стробирования отсутствует. Простым способом устранить нежелательное обратное рассеяние является разнесение приёмника и передатчика на некоторое расстояние друг от друга. Однако большое расстояние между приёмником и передатчиком увеличивает габариты прибора, что не всегда возможно. В связи с этим возникает вопрос об оптимальном

расстоянии между приёмником и передатчиком в лидарных комплексах наземного базирования. В то же время рассеяние лазерного излучения является измеряемой величиной при задаче локации мощных лазерных пучков в атмосфере, которые могут быть обнаружены пассивными лидарами и определены такие их параметры как местоположение и мощность.

Целью данной работы является определение величины обратного рассеяния лазерного излучения для лидара с мощным передатчиком, измеряющего концентрацию примесных газов в атмосфере, в частности метана, определение оптимального разнесения его приёмника и передатчика, а также оценка возможности локации пассивными лидарами мощных лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере Земли.

Рассмотрим геометрию задачи (рис. 1), где α и β — соответственно полные углы полей зрения приёмного и передающего объективов. Причём будем считать для упрощения выкладок, что $\alpha \gg \beta$, то есть передающий пучок — слаборасходящийся

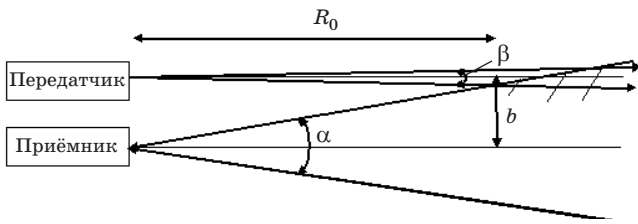


Рис. 1. Схема расположения приёмника и передатчика лидара в задаче обратного рассеяния света.

со средним радиусом r . Расстояние до точки рассеяния обозначим R , а расстояние между осями приёмного и передающего объективов b . Как видно из рисунка, поле зрения передающего объектива начинает перекрывать поле зрения приёмного объектива (с этого расстояния уже возможен приём обратного рассеяния) с расстояния R_0 , которое при условии $\alpha \gg \beta$ примерно равно

$$R_0 \approx b / (\alpha / 2). \quad (1)$$

Оценим величину мощности света обратного рассеяния, попадающую обратно в приёмный объектив. Формулу полного обратного рассеяния P_{scatt} можно записать в виде

$$P_{\text{scatt}} \approx \int_{R_0}^{\infty} P_0 \frac{\pi A^2}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \pi r^2 N dR, \quad (2)$$

где P_0 — излучаемая лидаром мощность, $P_0/(\pi r^2)$ — интенсивность (плотность мощности) падающего света, A — радиус приёмного объектива, N — число Лошмидта, r — средний радиус выходящего пучка света, $\pi r^2 N dR$ — число рассеивающих молекул на элементарном расстоянии dR , R — текущее расстояние от лидара до рассеивающего объёма, V — объём молекулы воздуха (кислорода, азота), λ — длина волны излучения. В формуле (2) сделано следующее допущение: индикатриса рассеяния [4] одиночной молекулы для закона Релея изотропна и пропорциональна величине, стоящей в круглых скобках формулы (2). Интерпретация данной формулы заключается в суммировании рассеянных величин мощности света, попадающих в приёмный объектив лидара, от всех молекул воздуха, находящихся на пути луча. Из формулы также видно, что в данном приближении результат расчёта не зависит от радиуса передающего объектива, поскольку сокращается величина πr^2 в числителе и знаменателе подынтегральной формулы. Проводя интегрирование в (2) и подставляя в полученный результат величину R_0 из (1), получаем

$$P_{\text{scatt}} \approx P_0 \pi A^2 \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 b / (\alpha / 2)} \right) N. \quad (3)$$

На рис. 2 изображена зависимость P_{scatt} от расстояния b при следующих параметрах лидарной

системы: $P_0 = 2$ Вт, $\alpha = 0,004$, $A = 2$ см, радиус молекулы воздуха принят равным $0,16$ нм [5], длина волны света λ — около 1650 нм, $R_0 \approx b/(\alpha/2)$ (расстояние между приёмником и передатчиком b изменяется от 5 до 40 см). Видно, что при разнесении приёмника и передатчика на 5 см, что имело место в начале эксперимента, обратное рассеяние составляет величину приблизительно $0,95 \times 10^{-11}$ Вт.

Для проверки полученных теоретических данных по формуле (3) был проведён эксперимент на горизонтальной трассе. Лидар с параметрами, указанными выше, работал по отражающей мишени, расположенной на расстоянии $R = 1250$ м, с коэффициентом отражения $k = 0,3$, а затем прицеливался в «небо», когда отсутствовали какие-либо отражающие мишени на пути луча. Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. Схема состояла из излучателя, приёмника, синхронизатора, контроллера с жидкокристаллическим индикатором, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и USB-интерфейса. Контроллер задаёт режим работы синхронизатора и запускает его. Синхронизатор управляет частотой излучения лазерного передатчика, передаёт периодические сигналы начала цикла измерений, сигналы запуска АЦП контроллера, вырабатывает

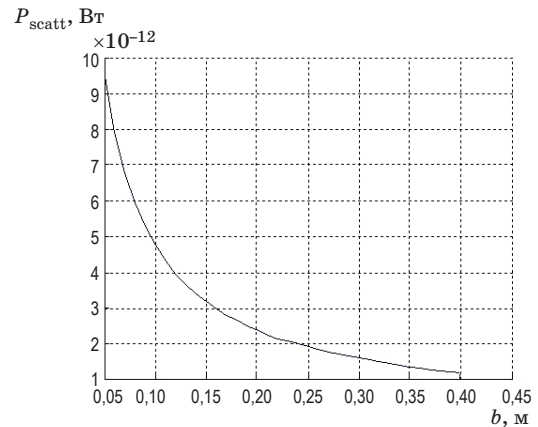


Рис. 2. Теоретическая зависимость мощности обратного рассеяния, попадающего в лидар, в зависимости от разнесения передатчика и приёмника b .

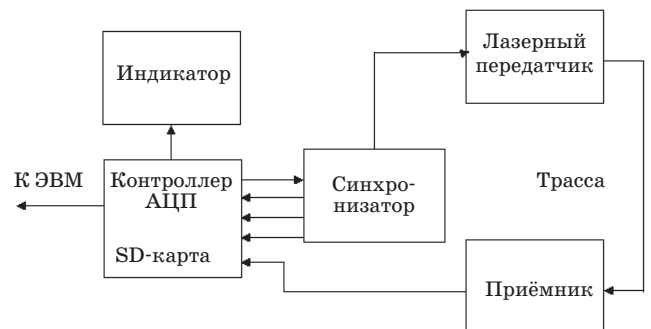


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки.

опорный линейно-частотный сигнал модуляции лазерного передатчика. Контроллер по каналу прямого доступа передает в память оцифрованные значения напряжения модуляции лазерного передатчика и принятого сигнала с приёмника, проводит усреднение сигналов и вычисляет амплитуду и фазу принятого и опорного сигналов, отображая результаты на индикаторе. Результаты обработки записывались на SD-карту и передавались также в ЭВМ. Средняя мощность лазерного передатчика составляла около 2 Вт на длине волны 1651 нм, в качестве фотоприёмника использовался лавинный фотодиод. В эксперименте использовался волоконный рамановский усилитель, который усиливал сигналы DFB-лазера OL6109L-10B фирмы OKI. Сигналы, полученные после фотоприёмника от отражающей мишени и от «неба», составили соответственно 2,0 и 0,3 В. То есть сигнал от «неба» был примерно в 7 раз меньше, чем от мишени. Расчёт мощности, принимаемой от мишени, даёт величину $7,7 \times 10^{-11}$ Вт. Следовательно, сигнал от «неба» составил величину в 7 раз меньше, то есть $1,1 \times 10^{-11}$ Вт. Теоретическое значение, определяемое из графика рис. 2, составляет величину $0,95 \times 10^{-11}$ Вт, что чуть меньше, чем в эксперименте. Такое различие, на наш взгляд, объясняется тем, что в момент измерений погода стояла пасмурная, и в атмосфере присутствовали пары воды, которые усиливали эффект обратного рассеяния. Впоследствии приёмник и передатчик были разнесены на расстояние 25 см друг от друга. Проведённый после этого замер обратного рассеяния показал, что оно снизилось в 5–6 раз и составило значение 0,053 В после фотоприёмника, что оказалось на уровне шумов аппаратуры и не влияло на результаты лидарных измерений.

Важно оценить величину обратного рассеяния P_{scatt} света при расположении лидара на низкоорбитальном космическом аппарате с высотой орбиты 450–500 км. В этом случае лидар принимает обратное рассеяние от всей толщи атмосферы, поскольку величина R_0 даже при большом разнесении приёмника и передатчика составляет величину заведомо меньше, чем высота орбиты. Для оценок можно применить формулу (3), где в качестве $R_0 \approx b/(\alpha/2)$ использовать высоту орбиты, а для числовых параметров следующие величины, типичные для лидаров космического базирования [6]: $P_0 \approx 30$ Вт, $A = 0,5$ м. Число Лёшмидта в формуле (3) необходимо взять среднее по высоте, поскольку концентрация молекул воздуха изменяется по барометрической формуле

$$N_{av} = \frac{1}{100} \int_0^{100} N \exp(-z/8,9) dz = 0,089N. \quad (4)$$

Здесь эффективный слой атмосферы с заметным давлением, по которому ведётся интегрирование,

составляет величину около 100 км, а число Лёшмидта на поверхности Земли равно $2,68 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$. На рис. 4 показана величина обратного рассеяния в зависимости от высоты орбиты спутника. Видно, что величина обратного рассеяния может составлять приблизительно $4,4 \times 10^{-13}$ Вт на высоте орбиты 450 км, что является заметной величиной, сравнимой с принимаемым полезным сигналом [6], и её надо учитывать при обработке результатов измерений. Сигнал от обратного рассеяния может проявляться в виде наводки и вносить дополнительные шумы в общий принимаемый сигнал. Этот эффект является, как упоминалось выше, специфичным для квазинепрерывных лидаров, а для импульсных может быть устранён с помощью стробирования.

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов по определению обратного рассеяния даёт возможность теоретических оценок общих потерь из-за рассеяния в атмосфере Земли оптического излучения с параметрами, указанными выше для луча, распространяющегося от передатчика космического аппарата к Земле. Для таких оценок воспользуемся тем, что общее рассеяние света в объёме луча определяется количеством молекул N_{tot} , находящихся в этом объёме

$$N_{\text{tot}} = \pi r^2 L N_{av}, \quad (5)$$

где $L = 100$ км — эффективный слой атмосферы, πr^2 — площадь луча лидара. $N_{av} = 0,089N$ — среднее число Лёшмидта в столбе воздуха, определяемое из (4). Мощность общего рассеяния запишется в виде

$$P_{\text{scatt_tot}} = 4\pi R^2 \frac{P_0}{\pi r^2} \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \pi r^2 L N_{av}. \quad (6)$$

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, то есть в телесном угле 4π . Вычисляя выражение (6) с параметрами $P_0 \approx 30$ Вт,

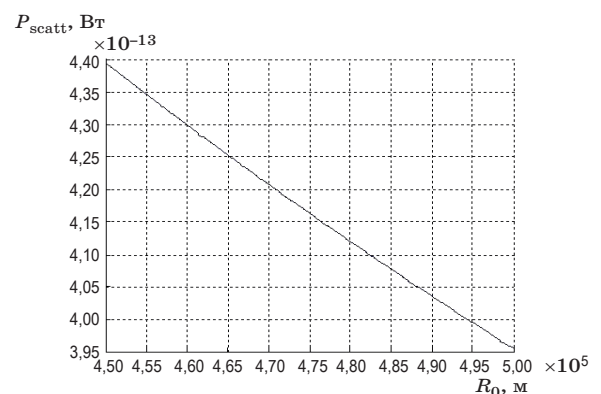


Рис. 4. Величина обратного рассеяния атмосферы, падающего в лидар в зависимости от высоты орбиты спутника.

радиусом молекулы воздуха 0,16 нм, $\lambda \approx 1650$ нм, получаем $P_{\text{scatt_tot}} = 0,67$ Вт. Такая мощность является прямой потерей оптического излучения при зондировании пучком с общей мощностью 30 Вт, и которая рассеивается по всем направлениям в приземном слое атмосферы, в основном в нижнем 10–100 километровом слое, составляя заметную часть от общей мощности зондирующего пучка.

Также можно провести оценку принимаемой мощности пассивным лидаром, находящимся на Земле, рассеянной мощности излучения пучка света, посылаемого, например, сторонним передатчиком с космической орбиты на Землю. Такая задача возникает при обнаружении оптического излучения особенно в связи с появлением мощных 100 кВт лазерных источников. В пассивном режиме в лидаре отключен свой собственный передатчик, а приёмник сканирует пространство с целью обнаружения мощных лазерных пучков от сторонних передатчиков. Если сторонний пучок имеет мощность, например P_0 , то рассеянное от него излучение в нижнем ($h \approx 10$ –100 километровом) слое атмосферы составит величину, равную по порядку величины $0,67(P_0/30) = 0,022P_0$. Задача сводится к возможности измерения пассивным лидаром части такой мощности, которая составляет величину $R\alpha/h$ от $0,022P_0$, где α — поле зрения приёмного объектива, а расстояние от лоцируемого луча до лидара R (радиус обзора). Геометрия задачи показана на рис. 5. Пусть, например, приёмный объектив имеет поле зрения $\alpha = 0,004$, а радиус входного зрачка объектива $A = 0,25$ м. Считая, что поле зрения объектива лидара перехватывает диаметр всего пучка излучения из космоса, можно оценить мощность рассеянного излучения, попадающего в приёмный объектив лидара, принимающий это излучение в телесном угле $\pi A^2/(4\pi R^2)$ как $P_{\text{lid}} \approx 0,022P_0(R\alpha/h)\pi A^2/(4\pi R^2) = 0,022P_0(\alpha/h)A^2/(4R)$. На рис. 6. изображена зависимость обнаруживаемой рассеянной мощности P_{lid} от величины P_0 при радиусе обзора $R = 20$ км. Видно, что при таком радиусе обзора мощность излучения, равную 10 Вт, можно обнаружить современными высокочувствительными фотоприёмниками (например, чувствительными лавинными фотодиодами) с порогом обнаружения $\text{NEP} \approx 3,2 \times 10^{-14}$ Вт/(Гц)^{1/2} [7]

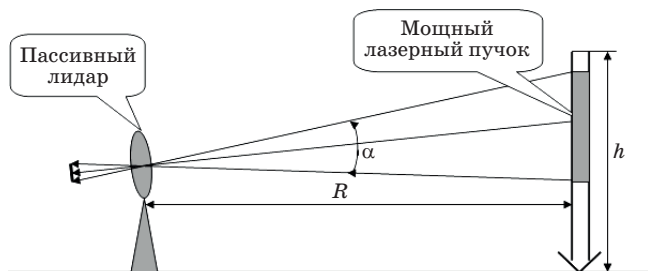


Рис. 5. Геометрия задачи пассивной локации пучка лазерного излучения.

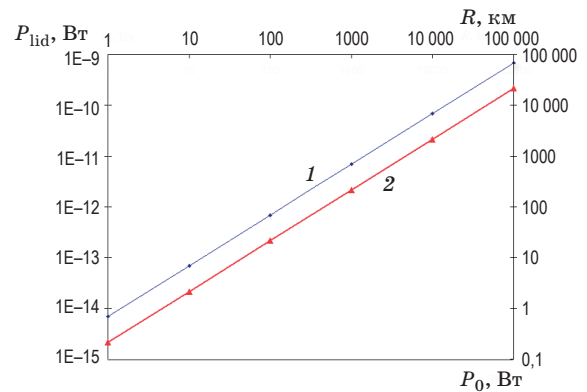


Рис. 6. Зависимость рассеянной мощности (1), принимаемой пассивным лидаром, от величины мощности передатчика P_0 (левая шкала), зависимость (2) радиуса обзора R от P_0 при принимаемой лидаром мощности $6,4 \times 10^{-13}$ Вт (правая шкала).

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 около $6,4 \times 10^{-13}$ Вт (сигнал/шум ≈ 20). Видно, что радиус обзора может достигать величины около 20000 км при лоцируемой мощности 100000 Вт, и это расстояние обнаружения является значительной величиной при локации мощного излучения, распространяющегося в атмосфере. Однако необходимо отметить, что данные оценки не учитывают фоновую засветку фотоприёмника дневным светом, рассеяние Ми аэрозолями и другими крупными частицами. Также не учитываются метеодальность видимости в атмосфере и нелинейные эффекты, поскольку считаем, что субмегаваттные мощности концентрируются на сравнительно большом диаметре лазерного луча, не создавая при этом плотности мощности, способные к его значительному тепловому размытию. Не обсуждаются и такие технические параметры фотоприёмника, как размер чувствительной площадки. В данном случае считается, что всё принимаемое излучение попадает на фоточувствительную площадку используемого лавинного фотодиода или матрицу лавинных фотодиодов. Однако для таких идеальных условий ночной, слабозамутнённой атмосферы видно, что для достаточно мощных пучков возможно даже загоризонтное обнаружение мощного лазерного излучения, распространяющегося в атмосфере.

Таким образом, проведённый теоретический расчёт адекватно описывает величину обратного рассеяния для лидарной аппаратуры графиком на рис. 2, подтверждённым проведённым экспериментом, и которым можно пользоваться в практических случаях, используя конкретные параметры аппаратуры. Для более полного подавления обратного рассеяния в описываемой аппаратуре

желательно разносить приёмник и передатчик на расстояние до 100 см, если позволяют габаритные ограничения. Тем не менее, разнесение на 25 см позволило ослабить сигнал обратного рассеяния почти в 6 раз, что оказалось на уровне шумов аппаратуры и не искажало результатов измерений.

Пассивный лидар для обнаружения лучей, распространяющихся в атмосфере, может обнаруживать такие лучи по Релеевскому рассеянию в слабозамутненной ночной атмосфере в радиусе обзора, равном 1–20000 км в зависимости от их мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abshire J.B., Riris H., Weaver C.J., Jianping Mao, Allan G.R., Hasselbrack W.E., Browell E.V.* Airborne measurements of CO₂ column absorption and range using a pulsed direct-detection integrated path differential absorption lidar // *Applied Optics*. 2013. V. 52. No. 19. P. 4446–4461.
2. Электронный ресурс: <http://www.k3pgp.org//laserscatter.htm>
3. *Акимова Г.А., Григорьевский В.И., Матайбаев В.В., Садовников В.П., Сырых Ю.П., Тезадов Я.А., Феденев А.В., Хабаров В.В.* Увеличение энергетического потенциала лидара для контроля метана на основе квазинепрерывного источника излучения // *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60. № 10. С. 1058–1061.
4. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Основы теоретической атмосферной оптики. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет, 2007. 152 с.
5. Электронный ресурс <http://www.ndva.ru/gazi/azot.html>
6. *Григорьевский В.И., Прилепин М.Т., Садовников В.П.* Методы лазерной дальнометрии в радио-оптических измерительных системах и устройствах мониторинга окружающей среды. М.: Янус-К, 2015. 135 с.
7. Лавинный диод IAG200. Электронный ресурс: <http://www.lasercomponents.com/>