

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПОЛОСНОГО ЛИДАРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Н. Г. Джавадов, Х. Г. Асадов*, Г. З. Байрамов

Национальное Аэрокосмическое Агентство, Баку, Азербайджан

* asadzade@rambler.ru

Аннотация. Предложен метод, предполагающий адаптивное изменение мощности лазера в зависимости от размера исследуемого участка леса для раннего обнаружения возгораний. Проведена оптимизация предлагаемого метода в отношении поиска такой зависимости мощности от расстояния, при которой минимизируется определяемая концентрация искомого вещества — продукта горения. С учетом ограничения выделяемого для такого мониторинга энергоресурса получена функциональная зависимость оптимальной мощности зондирующего излучения от расстояния до объекта, при которой порог регистрации концентрации продуктов горения достигает наименьшего значения.

Ключевые слова: пожары, дифференциальный абсорбционный лидар, мониторинг, оптимизация, энергоресурс

Ссылка для цитирования: Джавадов Н. Г., Асадов Х. Г., Байрамов Г. З. Использование многополосного лидара дифференциального поглощения для раннего обнаружения лесных пожаров // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 6. С. 520–525. DOI: 10.17586/0021-3454-2 025-68-6-520-525.

USING A MULTI-BAND DIFFERENTIAL ABSORPTION LIDAR FOR EARLY DETECTION OF FOREST FIRES

N. H. Javadov, H. G. Asadov*, H. Z. Bayramov

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

* asadzade@rambler.ru

Abstract. A method is proposed that involves adaptive change of laser power depending on the size of the forest area under study for early detection of forest fires. The proposed method is optimized in relation to finding such a power-distance dependence that minimizes the detectable concentration of the sought substance — the combustion product. Taking into account the limitation of the energy resource allocated for such monitoring, a functional dependence of the optimal power of the probing radiation on the distance to the object is obtained, at which the threshold for recording the concentration of combustion products reaches the lowest value.

Keywords: fires, differential absorption lidar, monitoring, optimization, energy resource

For citation: Javadov N. H., Asadov H. G., Bayramov H. Z. Using a multi-band differential absorption lidar for early detection of forest fires. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 6. P. 520–525 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-520-525.

Введение. В течение уже многих десятилетий лазеры используются для регистрации аэрозольных частиц дыма, выброшенных в атмосферу при различных возгораниях [1, 2]. В качестве ранних работ по использованию лидара для обнаружения лесных пожаров можно указать [3–6]. Способы регистрации основываются на рассеянии излучения лазера аэрозольными частицами, с учетом рассеяния Рэлея (упругие рассеяния) молекулами и атомами атмосферы. В статье [7] приведены результаты экспериментальных работ по обнаружению смоделированных возгораний в лесу при использовании лазерного излучения с длиной волны 1540 нм, энергией излучения 8 мДж, длительностью импульса 30 нс, частотой повторения 0,17 Гц. Согласно [7], дивергенция (расхождение) лазерного пучка составила 1 мрад, диаметр телескопа (апертура) — 38 мм, в качестве чувствительного элемента использован лавинный фотодиод на основе гетероструктуры InGaAs. При скорости сжигания биомассы 0,12 кг/с на расстоянии $R = 2$ км были получены значимые величины мощности отраженных сигналов P (рис. 1) [7].

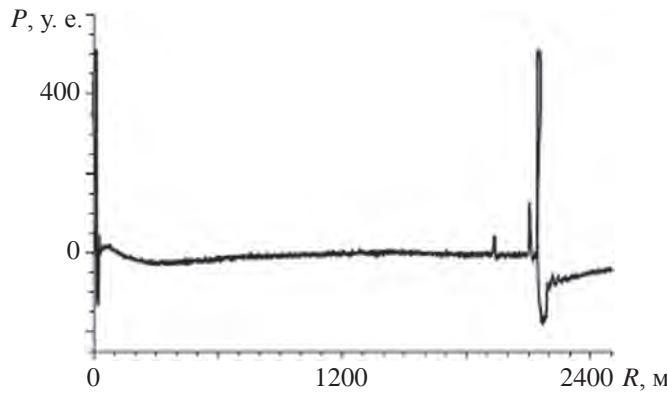


Рис. 1

Следует отметить, что для обнаружения мелких и крупных аэрозольных частиц также используется метод дифференциальной абсорбции с применением лазерных излучений на двух разных длинах волн λ_1 и λ_2 . Метод дифференциальной абсорбции основан на измерении интенсивности обратно рассеянного сигнала лазера в виде функции длины волны излучения λ_{on} (длина волны, соответствующая резонансной частоте абсорбционного перехода молекул измеряемого вещества) и λ_{off} (длина волны, на которой нет резонанса). Согласно [8], мгновенная мощность обратно рассеянного лазерного излучения P может быть вычислена по формуле

$$P(\lambda, R) = P_0 \frac{A_0}{R^2} \beta(\lambda, R) \frac{c\tau}{2} \exp \left[-2 \int_0^R k(\lambda, R') dR' \right], \quad (1)$$

где P_0 — исходная мощность лазера; R — расстояние, которое проходит лазерное излучение; c — скорость света; A_0 — площадь первичного зеркала телескопа; τ — ширина спектра лазерного импульса; β — коэффициент обратного рассеяния; k — коэффициент атмосферной экстинкции (ослабления).

Уравнение (1) может быть записано для длин волн λ_{on} и λ_{off} . При этом, согласно [8], среднюю по трассе концентрацию поглощающих молекул можно определить по формуле

$$n(R) = \frac{1}{2(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})} \left[\frac{d}{dR} \left\{ \ln \left[\frac{P(\lambda_{\text{off}}, R)}{P(\lambda_{\text{on}}, R)} \right] - n \left[\frac{\beta(\lambda_{\text{off}}, R)}{\beta(\lambda_{\text{on}}, R)} \right] \right\} + k_0(\lambda_{\text{off}}, R) - k_0(\lambda_{\text{on}}, R) \right], \quad (2)$$

где σ — поперечное сечение поглощения; k_0 — коэффициент суммарной атмосферной экстинкции на указанных длинах волн.

Очевидно, что этот метод работоспособен, если разность обратно рассеянных сигналов равна или превышает показатель эквивалентного шума фотоприемника (NEP). При этом, согласно [9], при использовании топографического отражателя минимально обнаруживаемое количество исследуемого вещества может быть вычислено по формуле

$$n_{\min} = \frac{\text{NEP} \cdot R}{2K \cdot A P_0(\lambda) \exp(-2\beta R)}, \quad (3)$$

где K — эффективность приемника; ρ — отражательная способность топографической цели; A — площадь приемного зеркала телескопа; $\exp(-2\beta R)$ — атмосферное ослабление; Δ — разность между коэффициентами абсорбции на длинах волн λ_{on} и λ_{off} . Среди работ, посвященных оптимизации использования лидара в целях раннего обнаружения возгорания в лесу, наиболее характерна [10], в которой отмечается, что отношение сигнал/шум в приемном сигнале детектора зависит как от параметров лазера, так и от условий приема излучения, также показано, что обратно рассеянный сигнал минимален, если проводимость атмосферы на расстоянии r_0

пропорциональна квадрату r_0 . Таким образом, анализ, выполненный в работе [10], позволил определить наихудший режим работы при использовании импульсного лазера только одной фиксированной длины волны. В отличие от [10], настоящая работа посвящена определению возможности и условий использования метода дифференциальной абсорбции для определения минимально возможной концентрации исследуемых веществ.

Материалы и методы. Как было отмечено выше, в методе дифференциальной абсорбции минимально обнаруживаемая концентрация исследуемого вещества определяется формулой (3). Следовательно, если принять возможность использования лазерной установки с регулируемой мощностью для исследования лесной территории на участках, где участок $0 - l_1$ исследуется лазером мощностью P_{01} ; $l_1 - l_2$ — лазером мощностью P_{02} ; $l_{n-1} - l_n$ — лазером мощностью P_{0n} , то можно говорить о возможности получения функциональной зависимости используемой мощности лазера от расстояния R . На рис. 2 представлена графическая интерпретация предлагаемого метода (i — номер поддиапазона; O — отражатель).

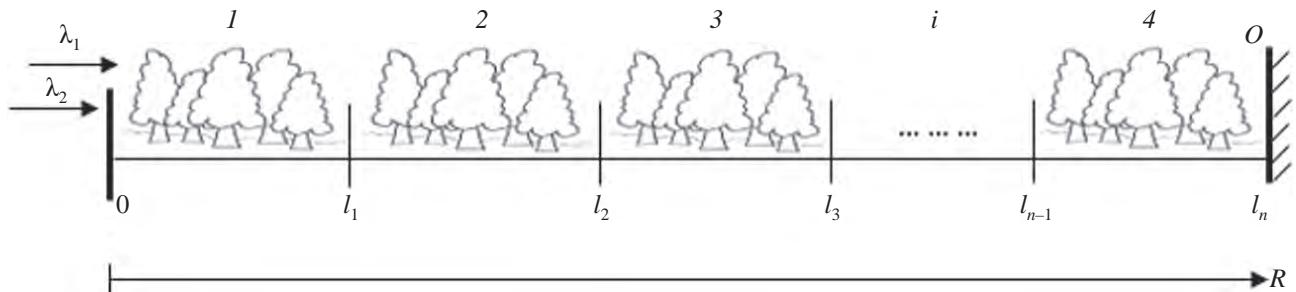


Рис. 2

Отметим, что использование лазерной установки с регулируемой мощностью и регистрация изменений мощности при исследовании лесной территории по участкам (по „поддиапазонам“) кроме ощутимой экономии энергии затрачиваемого лазерного контроля обширной территории лесов также позволит учесть нежелательные отражения от дальних участков мощных лазерных импульсов при исследовании близких участков леса.

Усредненное значение n_{\min} по всем „поддиапазонам“ определим как

$$n_{\min,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{NEP } R}{2K AP_{0i}(\) \exp(-2 R)}. \quad (4)$$

Дискретную модель (4) условно заменим на непрерывную модель в виде

$$n_{\min,00} = \frac{1}{R_m} \int_0^{R_m} \frac{\text{NEP } R dR}{2K AP_0(R) \exp(-2 R)}. \quad (5)$$

Таким образом, рассматриваемая задача оптимизации метода многодиапазонного лазерного мониторинга и раннего обнаружения возгорания лесов сводится к вычислению оптимальной функции $P_0(R)$, при которой $n_{\min,00}$ достиг бы наименьшего значения. С целью решения данной оптимизационной задачи следует учесть ресурсное ограничение по энергии, выделяемой для достижения цели. Указанное ограничение в непрерывной форме можно сформулировать следующим образом:

$$\int_0^{R_m} P_0(R) dR = C; C = \text{const.} \quad (6)$$

С учетом выражений (5) и (6) сформируем целевой функционал F , ($n_{\min,0}$), безусловной вариационной оптимизации

$$F = \frac{1}{R_m} \int_0^{R_m} \frac{\text{NEP} \cdot R dR}{2K \cdot AP_0(R) \cdot \exp(-2\beta R)} + \gamma \left[\int_0^{R_m} P_0(R) dR - C \right], \quad (7)$$

где γ — множитель Лагранжа.

Введя обозначение

$$\frac{\text{NEP}\pi}{2K\rho A(\Delta\sigma)} = z, \quad (8)$$

выражение (7) можно представить как

$$n_{\min,0} = \frac{1}{R_m} \int_0^{R_m} \frac{zR dR}{\exp(-2\beta R)P_0(R)} + \gamma \left[\int_0^{R_m} P_0(R) dR - C \right]. \quad (9)$$

Согласно методу Эйлера, выражение (9) должно удовлетворять условию

$$\frac{d \left\{ \frac{zR dR}{R_m \exp(-2\beta R)P_0(R)} + \gamma P_0(R) \right\}}{dP_0(R)} = 0, \quad (10)$$

следуя которому, получим

$$-\frac{zR}{R_m \exp(-2\beta R)P_0^2(R)} + \gamma = 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) находим

$$P_0(R) = \sqrt{\frac{zR}{\gamma P_m \exp(-2\beta R)}}. \quad (12)$$

Поскольку производная этого выражения по искомой функции всегда является положительной величиной, в точке экстремума для концентрации получим наименьшее значение ($n_{\min,0}$).

Для вычисления множителя Лагранжа воспользуемся выражениями (6) и (11):

$$\int_0^{R_m} \sqrt{\frac{zR}{\gamma P_m \exp(-2\beta R)}} dR = C. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$\sqrt{\gamma} = \frac{1}{C} \int_0^{R_m} \sqrt{\varphi(R)} dR, \quad (14)$$

где

$$\varphi(R) = \frac{zR}{P_m \exp(-2\beta R)}. \quad (15)$$

С учетом выражений (12) и (15) получим

$$P_0(R) = \frac{C \sqrt{\frac{R}{\exp(-2\beta R)}}}{\int_0^{R_m} \sqrt{\frac{R}{\exp(-2\beta R)}} dR}. \quad (16)$$

Таким образом, при условии (16) чувствительность предлагаемого многодиапазонного метода дифференциального абсорбции достигает максимума.

Заключение. Рассмотрена возможность использования лазеров для раннего обнаружения возгорания на лесных участках. Обсуждены особенности дифференциального абсорбционного метода обнаружения возгорания. Предложен метод многодиапазонного дифференциального адсорбционного лазерного мониторинга пожаробезопасности лесов, суть которого заключается в адаптивном изменении мощности лазерного излучения в зависимости от удаленности излучателя от исследуемого участка.

Проведена оптимизация в части поиска функциональной зависимости мощности лазера от расстояния до исследуемого участка, которая позволит повысить чувствительность метода к обнаружению концентрации вещества — продукта возгорания биомассы. Согласно полученному результату, с учетом выделяемого энергоресурса для проведения такого мониторинга получена функциональная зависимость оптимальной мощности зондирующего излучения от расстояния до объекта, $P_0(R)$, при которой порог регистрации концентрации продуктов горения достигает наименьшего значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hamilton P. M.* The application of a pulsed-light ranger finder (Lidar) to the study of chimney plumes // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1969. Vol. 265. P. 153–172.
2. *Hinkley E. D.* Laser monitoring of the atmosphere. Berlin: Springer, 1976.
3. *Vilar R., Lavrov A.* Estimation of required parameters for detection of small smoke plumes by Lidar at 1.54 μm // Appl. Phys. B. 2000. Vol. 71. P. 225–228.
4. *Utkin A. B., Simoes F., Fernandes A., Lavrov A., Vilar R.* Detection of forest fire using lidar: Final report on GESTOSA. Coimbra University, 2001.
5. *Utkin A. B., Lavrov A. V., Costa L., Simões F., Vilar R.* Detection of small forest fires by Lidar // Appl. Phys. B. 2002. Vol. 74, N 1. P. 77–83.
6. *Vilar R. M., Lavrov A. V., Utkin A. B., Fernandes A.* Comparison of eye-safe UV and IR lidar for small forest fire detection // SPIE Proc. of Remote sensing for agriculture. Ecosystems and hydrology III. 2002. Vol. 4542. P. 280–285.
7. *Lavrov A., Utkin A. B., Vilar R.* Experimental and theoretical investigation of forest fire detection by a portable eye-safe lidar operating at 1540 nm // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2009. Vol. 7131. P. 71312J. DOI:10.1117/12.816515.
8. *Bellecci C., Francucci M., Gaudio P., Gelfusa M., Martellucci S., Richetta M.* Early detection of small forest fire by dial technique// Remote Sensing for agriculture. Ecosystems and hydrology VII. Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5976.
9. *Menyuk N., Killinger D. K., Defeo E.* Laser remote sensing of hydrazine, MMH and UDMH using a differential-absorption CO₂ lidar // Appl. Optics. 1982. Vol. 21. P. 2275.
10. *Мехтиев Дж. С.* Вопросы использования лидаров для контроля лесных пожаров в горных массивах // Изв. вузов. Лесной журнал. 2015. № 4. С. 68–75.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Натиг Гаджи оглы Джавадов

— д-р техн. наук, профессор; Национальное Аэрокосмическое Агентство; генеральный директор; E-mail: nasa@mdi.gov.az

Хикмет Гамид оглы Асадов

— д-р техн. наук, профессор; НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, отдел атмосферных исследований; нач. отдела; E-mail: asadzade@rambler.ru

Гусейн Закир оглы Байрамов

— аспирант; Национальное Аэрокосмическое Агентство; E-mail: huseyn.bayramov0288@gmail.com

Поступила в редакцию 28.10.24; одобрена после рецензирования 25.11.24; принята к публикации 25.04.25.

REFERENCES

1. Hamilton P.M. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*, 1969, vol. 265, pp. 153–172.
2. Hinkley E.D. *Laser monitoring of the atmosphere*, Berlin, Springer, 1976.
3. Vilar R., Lavrov A. *Appl. Phys. B*, 2000, vol. 71, pp. 225–228.
4. Utkin A.B., Simoes F., Fernandes A., Lavrov A., Vilar R. *Detection of forest fire using lidar*, Final report on GESTOSA, Coimbra University, 2001.
5. Utkin A.B., Lavrov A.V., Costa L., Simões F., Vilar R. *Appl. Phys. B*, 2002, no. 1(74), pp. 77–83.
6. Vilar R.M., Lavrov A.V., Utkin A.B., Fernandes A. *SPIE Proc. of Remote sensing for agriculture. Ecosystems and hydrology III*, 2002, vol. 4542, pp. 280–285.
7. Lavrov A., Utkin A. B., Vilar R. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, vol. 7131, pp. 71312J, DOI:10.1117/12.816515.
8. Bellecci C., Francucci M., Gaudio P., Gelfusa M., Martellucci S., Richetta M. *Remote Sensing for agriculture. Ecosystems and hydrology VII. Proc. of SPIE*, 2005, vol. 5976.
9. Menyuk N., Killinger D. K., Defeo E. *Appl. Optics*, 1982, vol. 21, pp. 2275.
10. Mechtiev G.S. *Russian Forestry Journal*, 2015, no. 4, pp. 68–75.

DATA ON AUTHORS

Natig G. Javadov

— Dr. Sci., Professor; Azerbaijan National Aerospace Agency; Director General; E-mail: nasa@mdi.gov.az

Hickmet G. Asadov

— Dr. Sci., Professor; Azerbaijan National Aerospace Agency, Department of Atmospheric Research; Head of the Department; E-mail: asadzade@rambler.ru

Huseyn Z. Bayramov

— Post-Graduate Student; Azerbaijan National Aerospace Agency; E-mail: huseyn.bayramov0288@gmail.com

Received 28.10.24; approved after reviewing 25.11.24; accepted for publication 25.04.25.