

УДК 630*432

ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИДАРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ГОРНЫХ МАССИВАХ

© Дж. С. Мехтиева, канд. техн. наук, доц.

Национальная академия авиации, Бина, 25-й км, г. Баку, Азербайджан, AZ1045;
e-mail: ekologiya.maa@mail.ru

Дан краткий обзор состояния организации лидарного контроля для обнаружения лесных пожаров в горной местности. Задачей оптимизации лидарного контроля является раннее обнаружение слабого дыма. Отмечено, что лесные пожары часто возникают в ущельях или на склонах гор, а лидары, установленные на высотных точках, регистрируют лишь сильно ослабленный дым на фоне частично задымленного воздуха на склоне гор. При этом конфигурация местности играет значительную роль в формировании результирующего отношения сигнал/шум в горной местности. Общая эффективность работы лидарной системы обнаружения лесных пожаров зависит не только от отношения сигнал/шум на выходе системы обнаружения и ее быстродействия, но и от трехмерной конфигурации лесного массива, где проводится лидарный контроль. Целью статьи является анализ возможности выбора оптимального режима работы системы лидарного контроля и выработка на ее основе новой конфигурации сети лидарного контроля лесных пожаров в холмистой местности. Для выбора конфигурации сети контроля осуществлена оптимизация лидарного контроля возникновения лесных пожаров в ущелья горных массивов. Сформулировано ограничительное условие, наложенное на интегральное пропускание атмосферы по трассе наблюдений. Сформулирована и решена вариационная задача безусловной оптимизации с ограничением. Показано, что оптимальным режимом лидарного контроля возгорания лесов на горном ущелье является обеспечение обратной зависимости между пропусканием атмосферы и контролируемой дистанцией. Дана рекомендация по оптимальному построению лидарной системы контроля возникновения лесных пожаров в горных массивах.

Ключевые слова: лесные пожары, лидарный контроль, атмосфера, оптимизация, раннее обнаружение, пропускание.

Хорошо известно [1–4], что использование лидаров для обнаружения дыма лесных пожаров позволяет определить направление и расстояние до источника дыма, а также концентрацию сгенерированных огнем аэрозольных частиц, содержащихся в нем, для оценки степени развития возгорания. Благодаря высокой чувствительности и высокому пространственному разрешению лидаров, оказывается возможным обнаружение слабой задымленности на раннем этапе возникновения лесных пожаров в любое время суток.

Экспериментальные исследования лидаров, проведенные в рамках проекта “Gestosa 2001” в Португалии в 2000 г. [3], показали возможность обнаружения дыма на расстоянии до 6,5 км при скорости горения 0,025 кг/с. Исследованиями [4] установлено, что с помощью лидаров появляется возможность обнаружения дыма на расстоянии 6,5 км и при скорости горения 0,020 кг/с. При этом удавалось обнаружить дым через 40 с после начала пожара.

Исследования [3] по выяснению возможности обнаружения дыма лесных пожаров с помощью одноволнового лидара, работающего на длине волны 532 нм, показали, что в целях повышения безопасности возможно снижение мощности одного импульса с одновременным повышением частоты повторения импульсов. Такой режим работы прибора позволяет повысить безопасность лазера для человеческого зрения, не снижая при этом его чувствительность.

Согласно работе [2], с помощью лидара, работающего на длине волны 532 нм, можно обнаружить малые лесные пожары на расстоянии 7...15 км при соотношении сигнал/шум > 5 (в зависимости от режима работы, масштабов и геометрии наблюдений).

В работе [5] сообщается о результатах экспериментальных исследований по обнаружению лесных пожаров с помощью портативного безопасного лидара (Nd:YAG лазер мощностью 100 мДж, работающий на длинах волн 1064 и 532 нм, длительность импульсов 30 нс). Анализ результатов более 600 измерений показал возможность регистрации пожаров на расстоянии $\sim 5,5$ км. Общий вид приемных сигналов лидара, отраженных от дыма пожара со скоростью горения 0,120 кг/с при разных соотношениях сигнал/шум, показан на рис. 1 *а, б*; на рис. 1 *в, г* кривые 1 и 3 соответствуют скорости горения 0,120 кг/с, кривые 2 и 4 – 3,100 кг/с. Как видно из рис. 1 *в, г*, при скорости горения 0,120 и 3,100 кг/с возможно обнаружение дыма на расстоянии 3,4 км и 5,5 км соответственно.

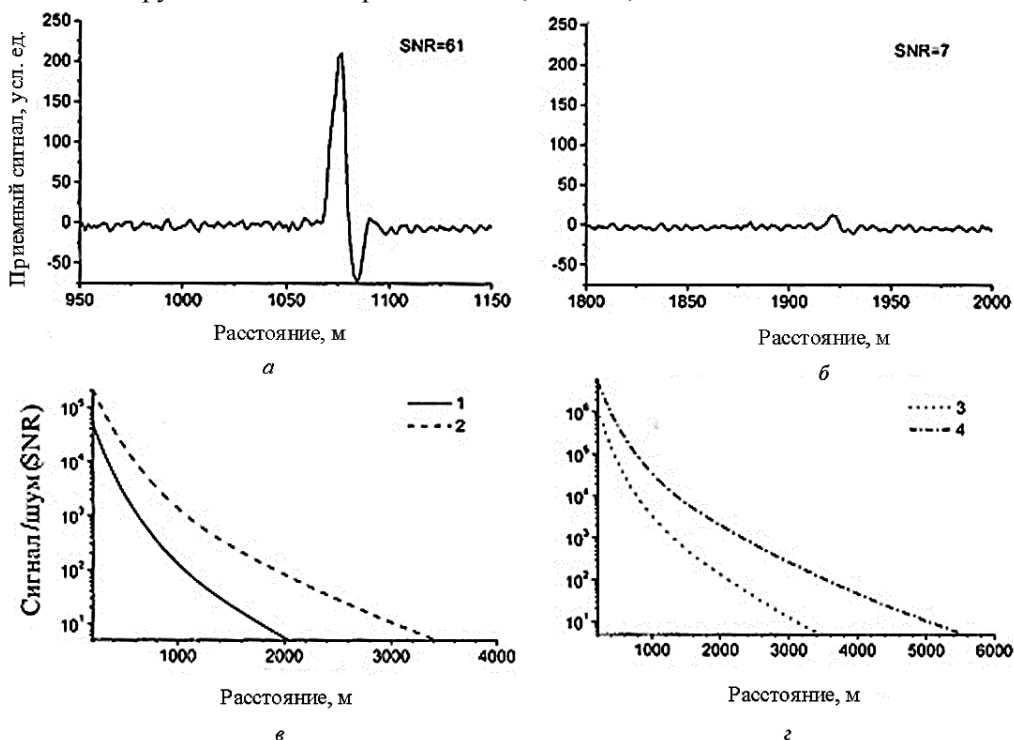


Рис. 1. Общий вид приемных сигналов лидара (*а, б*) и соотношения сигнал/шум (*в, г*) при различных режимах горения

Вместе с тем, общая эффективность работы лидарной системы обнаружения лесных пожаров зависит не только от соотношения сигнал/шум на выходе и быстродействия системы, но и трехмерной конфигурации лесного массива, где проводится лидарный контроль.

Согласно работе [4], мощность приемного сигнала лидара определяется по следующей формуле:

$$P_r(R) = E_p \frac{c(\beta(R)) A_r}{2 R^2} \tau_t \tau_r \exp\left(-2 \int_0^R \alpha(R') dR'\right), \quad (1)$$

где R – текущее расстояние;

E_p – энергия импульса лазера;

c – скорость света;

$\beta(R)$ – среднее значение коэффициента обратного рассеяния;

A_r – эффективная площадь приемника;

τ_t – эффективность передатчика;

τ_r – эффективность приемника;

α – коэффициент ослабления.

Как указано в работе [3], в первичной стадии дым от лесных пожаров является очень густым и соответствующий сигнал лидара представляет собой узкий и достаточный сильный пиковый сигнал. Для оценки соотношения сигнал/шум особое значение приобретают фоновые шумы, имеющиеся вокруг указанных пиковых сигналов.

При этом суммарные шумы образуются из-за атмосферных эффектов, а также по причине шумов оптического тракта приемного устройства. Выходной сигнал собственно фотоумножителя содержит следующие составляющие:

ток, образованный из-за приема энергии лазерного луча, оцениваемый как

$$I_{sig} = P_r' R_p G; \quad (2)$$

ток, образованный из-за влияния фоновой радиации, оцениваемый как

$$I_{bgnd} = P_{bgnd} R_p G; \quad (3)$$

темновой ток катода I_{dark} .

Здесь P_r' – мощность излучения обратного рассеяния в окрестности пика сигнала;

R_p – чувствительность фотокатода;

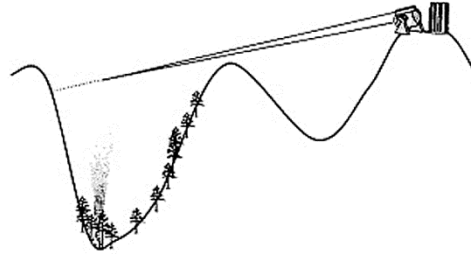
G – коэффициент усиления фотоумножителя;

P_{bgnd} – мощность принятой фоновой радиации солнца.

Согласно [3] результирующее соотношение сигнал/шум (S/N) на выходе приемника лидара при проведении n измерений определяется по следующей формуле:

$$S/N = \frac{P_r R_p G \sqrt{n}}{\sqrt{2e G^2 F B_e (P_r' R_p + P_{bgnd} R_p + I_{dark} / G)}}. \quad (4)$$

Рис. 2. Схема проведения лазерного контроля в горной местности



Таким образом, соотношение сигнал/шум не определяется одним только приемным лучом отраженного лазерного сигнала, а также зависит от условий приема.

В качестве подтверждения этого вывода рассмотрим пример, заимствованный из работы [3], где качественно проанализирована закономерность образования соотношения сигнал/шум в процессе проведения лидарного контроля при возгорании лесов на горных холмах (рис. 2).

Лесные пожары часто возникают в ущельях или на склонах гор, и как результат, лидары, установленные на высотных точках, регистрируют сильно ослабленный дым на фоне частично задымленного воздуха на склоне гор. Таким образом, конфигурация местности также играет значительную роль в формировании результирующего соотношения сигнал/шум в горной местности.

Цель настоящей работы – анализ выбора оптимального режима работы системы лидарного контроля и разработка новой конфигурации сети лидарного контроля лесных пожаров на холмистой местности.

Согласно [1] сигнал, или количество фотоэлементов $n(r_0)$, образованных в приемнике лидара при поступлении отраженного сигнала с расстояния r_0 и дифференциального интервала Δr_0 , оценивается по следующей формуле:

$$n(r_0) = \left(\lambda \delta_\lambda \Delta r_0 E_0 / hc \right) \left(\frac{A_r}{r_0^2} \right) \beta(r_0) T(r_0)^2, \quad (5)$$

или

$$n(r_0) = C \left(\frac{A_r}{r_0^2} \right) \left(\frac{\bar{P}_{180}}{4\pi} \right) T(r_0)^2, \quad (6)$$

где

λ – длина волны;

δ_λ – квантовая эффективность приемника;

E_0 – энергия импульса;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

A_r – эффективная площадь телескопа;

$\beta(r_0)$ – коэффициент обратного рассеяния с расстояния r ;

$T(r_0)^2$ – пропускание атмосферы на расстоянии r_0 ,

$$T(r_0)^2 = e^{-2 \int_0^{r_0} \sigma_e(r) dr}; \quad (7)$$

C – общий коэффициент калибровки лидара;

\bar{P}_{180} – весовая фазовая функция для угла рассеяния 180° ;

$\sigma_e(r)$ – коэффициент ослабления.

Так как рассматривается задача раннего обнаружения слабого дыма, то в выражении (7) можно принять, что

$$\int_0^{r_0} \sigma_e(r) dr < 0,1. \quad (8)$$

С учетом условия (8) выражение (7) запишем как

$$T(r_0) = 1 - \int_0^{r_0} \sigma_e(r) dr. \quad (9)$$

Рассмотрим бинарный случай, когда возгорание происходит либо в правой, либо в левой части ущелья между холмами (рис. 3). Для такой идеализированной бинарной модели можно принять следующие линейные аппроксимации $\sigma_e(r)$:

возгорание на правом участке

$$\sigma_{e_1}(r) = kr; \quad (10)$$

возгорание на левом участке

$$\sigma_{e_2}(r) = A - kr. \quad (11)$$

С учетом (9)–(11)

$$T(r_0)_1 = 1 - \frac{kr_0^2}{2}; \quad (12)$$

$$T(r_0)_2 = 1 - Ar_0 + \frac{kr_0^2}{2}. \quad (13)$$

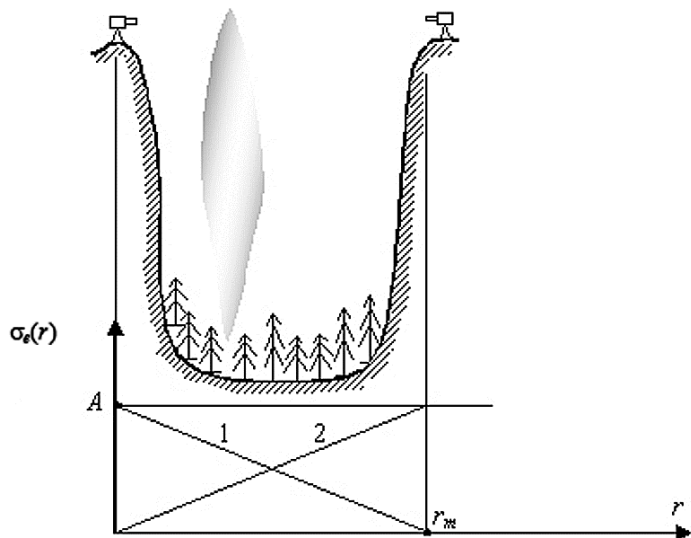


Рис. 3. Бинарная модель случаев возгорания

Если в выражении (13) обеспечить выполнение условия

$$A = kr_0, \quad (14)$$

получим

$$T(r_0)_1 = T(r_0)_2.$$

Таким образом, с учетом принятой бинарной модели возгорания в ущельях горных массивов в первом приближении можно сформулировать следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{r_m} T(r_0) dr_0 = C_1; \quad C_1 = \text{const.} \quad (15)$$

С учетом (5) и (15) составим уравнение безусловной вариационной оптимизации:

$$F = \int_0^{r_m} M dr_0 = \int_0^{r_m} \left(\frac{\lambda \delta_\lambda \Delta r_0 E_0}{hc} \right) \left(\frac{A_r}{r_0^2} \right) \beta(r_0) T^2(r_0) dr_0 + \gamma \int_0^{r_m} T(r_0) dr_0, \quad (16)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Для нахождения вида функции $T(r_0)$, приводящей F к экстремальной величине, воспользуемся методом Эйлера, согласно которому искомый вид функции $T(r_0)$ должен удовлетворить условию

$$\frac{dM}{dT(r_0)} = 0. \quad (17)$$

Тогда выражение (16) преобразим с учетом условия (17):

$$\frac{2BT(r_0)}{r_0^2} + \gamma = 0, \quad (18)$$

где $B = \frac{\lambda \delta_\lambda \Delta r_0 A_r \beta(r_0) E_0}{hc}$.

Из выражений (15) и (18) находим

$$\gamma = -\frac{6C_1 B}{r_m^3}. \quad (19)$$

С учетом (18) и (19) имеем

$$T(r_0) = \frac{3C_1 r_0^2}{r_m^3}. \quad (20)$$

Легко доказать, что $\frac{d^2M}{dT(r)^2}$ является положительной величиной, т. е.

функция (20) приводит функционал (16) к его минимальной величине. Следовательно, оптимальный лидарный контроль следует организовать таким образом, чтобы обеспечить обратную зависимость между T и r_0 . Этого можно достичь, организовав двойной лидарный контроль лесного массива в ущелье (рис. 3) за счет выбора сигнала того лидара, для которого обеспечивается

вышеуказанное условие. Например, если возгорание происходит на левой половине ущелья, то оптимальным считается обработка сигнала правого лидара, и наоборот. Таким образом, организация парной работы двух лидаров позволяет обеспечить наибольший сигнал, подлежащий обработке как при обнаружении, так и предсказании лесных пожаров.

Выводы

1. Показано, что оптимальным режимом лидарного контроля за возгоранием лесов в горном ущелье является обеспечение обратной зависимости между пропусканьем атмосферы и контролируемой дистанцией.

2. Для оптимального использования лидарной системы контроля возникновения лесных пожаров в горных массивах предложена установка двух лидаров и выбор сигнала того лидара, для которого обеспечивается рекомендуемый оптимальный режим работы в зависимости от возгорания на правой или левой стороне горного ущелья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lavrov A., Utkin A.B., Vilar R., Conde O., Fajardo M., LO Silva, Pires M. Experimental and theoretical of forest fire detection by a portable eye-safe lidar operating at 1540 nm. // Proc. SPIE 04/2009; 7131:71312J. DOI: 10.11117/12.816515.
2. Porter J.N., Sharma S.K., Lienert B.R. Obtaining calibrated marine aerosol extinction measurements using horizontal lidar measurements, differential lidar-target measurements and a polar nephelometer // SPIE Meeting Proceedings. Japan. 2000.
3. Utkin A.B., Fernandes A., Simoes F., Lavrov A., Vilar R. Feasibility of forest-fire smoke detection using lidar // International Journal of Wildland Fire. 2013. N 12. P. 159–166.
4. Utkin A.B., Fernandes A., Simoes F., Vilar R. Forest-fire detection by means of lidar. <http://www.millpress.nl/chop/aboeks/ICFFR4/pdf/057.pdf>
5. Utkin A.B., Lavrov A.V., Costa L., Simoes F., Vilar R. Detection of small forest fires by lidar // Applied Physics. 2002. B. 74. P. 77–83, DOI:10.1007/s003400100772.

Поступила 02.04.14

UDC 630*432

Questions on Lidars Use for Control and Detection of Forest Fires in Mountainous Zones

J.S. Mekhtiyev, Candidate of Engineering, Associate Professor
National Aviation Academy, Bina, 25th km, Azerbaijan, AZ10145, Baku; e-mail: ekologiya.maa@mail.ru

The brief review of organization condition of lidar control for detection of forest fires in mountainous zones has given. It is noted, that the forest fires take place in ravines or flanks of hills, and as a result, lidars, installed at the elevated sites detects heavily attenuated smoke at the background of not clean but partly polluted air at the flanks of hills. The configuration

of the locality plays a significant role in formation of resulting at the output of lidar system signal/noise ratio in mountainous zone. At the same time the total effectiveness of lidar system functioning depends on not only signal/noise ratio at the output of detection system and its quickness of operation, but also on 3D configuration of forest zone, where the lidar system should be installed. The aim of the article is analysis of possibility for selection of optimum operation regime of lidar control system and development on this basis the new configuration of net designated for lidar control of forest fires in mountainous zones. In order to choose the configuration of the control net the optimization of lidar detection of forest fires in ravines of mountainous zones is carried out. The aim of optimization of lidar control is earlier detection of weak smoke. The limitation condition applied to integral transmission of atmosphere on route of control is formulated. The variational task of non-conditional optimization with limitation is formulated and solved. It is shown, that the optimum regime of lidar control of forest fire at the ravines of mountainous zones is provision of inverse relation between atmospheric transmission and the controlled distance. The recommendations on optimum development of lidar system for control of forest fires in mountainous zones are given

Keywords: forest fires, lidar control, atmosphere, optimization, early detection, transmission.

REFERENCES

1. Lavrov A., Utkin A.B., Vilar R., Conde O., Fajardo M., LO Silva, Pires M. Experimental and theoretical of forest fire detection by a portable eye-safe lidar operating at 1540 nm. *Proceedings SPIE* 04/2009; 7131:71312J. DOI:10.11117/12.816515
2. Porter J.N., Sharma S.K., Lienert B.R. Obtaining calibrated marine aerosol extinction measurements using horizontal lidar measurements, differential lidar target measurements and a polar nephelometer. *SPIE Meeting Proceedings*, Japan 2000.
3. Utkin A.B., Fernandes A., Simoes F., Lavrov A., Vilar R. Feasibility of forest-fire smoke detection using lidar. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, no. 12, pp. 159–166.
4. Utkin A.B., Fernandes A., Simoes F., Vilar R. Forest-fire detection by means of lidar. Available at: <http://www.millpress.nl/chop/aboeks/ICFFR4/pdf/057.pdf>.
5. Utkin A.B., Lavrov A.V., Costa L., Simoes F., Vilar R. Detection of small forest fires by lidar. *Applied Physics*. 2002, B.74, pp. 77–83. DOI:10.1007/s003400100772.

Received on April 02, 2014
