

Повышение эффективности функционирования лидарно–солнечно–фотометрических систем

Асадов Х. Г.¹, Маммадова У. Ф.²

¹Национальное аэрокосмическое Агентство, г.Баку, Азербайджанская Республика

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г.Баку, Азербайджанская Республика

E-mail: asadzade@rambler.ru

Исследован вопрос об оценке эффективности функционирования лидарно-фотометрических систем. Лидарные системы как наземного, так и космического назначения проходят первичные проверку и валидацию полученных данных при проведении наземных измерений и формирование новых критериев эффективности функционирования лидарно-фотометрических систем сохраняет актуальность для всего подкласса систем лазерного зондирования атмосферы. Низкая величина отношения сигнал/шум приемных сигналов, влияние облаков, а также допущенные ошибочные исходные оценки отношения коэффициента ослабления к коэффициенту рассеяния могут привести к негативному результату. По этой причине для уменьшения погрешности функционирования лидаров используется их совместная работа с солнечным фотометром. В настоящей статье для комплекса дистанционного зондирования, состоящего из лидара и солнечного фотометра, предложен критерий эффективности функционирования, представляющий собой ковариацию двух функций — (а) отраженного сигнала, в зависимости от дальности зондирования и (b) мощности излучения лазера, принятой в данной работе в качестве функции от указанной дальности. Лидарно-фотометрическая система исходно считается эффективной в том случае, если ковариация указанных функций достигает минимума, т.е. зондирующий и отраженный сигналы максимально различны. Сформулирована оптимизационная задача по схеме безусловной вариационной оптимизации при некотором интегральном ограничении наложенном на искомую функцию зависимости мощности лазера от расстояния зондирования. Решение оптимизационной задачи по методу Эйлера позволило получить оптимальный вид искомой функции, при которой принятый критерий эффективности достигает экстремума (минимума), что означает работу системы с максимальной эффективностью.

Ключевые слова: лидар; эффективность; солнечный фотометр; комплекс; оптимизация

DOI: [10.20535/RADAP.2020.83.36-40](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.36-40)

Введение

По техническому назначению различают лидары и лидары, физический принцип функционирования которых одинаков. Лидар является одним из наиболее широко используемых систем активного дистанционного зондирования и предназначен для получения информации об объектах, находящихся в различных средах распространения. Лидарные системы устанавливаются либо на земле, или на платформах, размещаемых на борту самолета или спутника. Лидар используется в основном для исследования атмосферы, для чего применяется метод упругого или неупругого рассеяния на молекулах газа или аэрозольных частицах.

В общем случае лидары могут быть использованы для исследования видимости атмосферы [1], относительной влажности [2], атмосферного аэрозоля [3, 4], малых газов атмосферы [5, 6], облаков [7, 8] и др.

Как отмечается в работе [9], лидары являются важнейшим инструментом для изучения влияния атмосферного аэрозоля на энергетический баланс планеты. Высокая изменчивость аэрозоля во времени и в пространстве, распределенный характер размещения источников аэрозоля, большее количество механизмов их генерации, наличие различных физических механизмов их преобразования и трансформации привело к тому, что лидарные системы стали размещаются не только на земле, но и на космических аппаратах.

В настоящее время в космическом пространстве функционируют две лидарные системы: Облачно-аэрозольный лидар с ортогональной поляризацией (CALIPSO) на борту спутника CALIPSO, а также лидарная система CATS на борту международной космической станции (ISS). Также планируются запуск совместного спутника EARTH CARE (совместно ESA и JAXA), содержащего на борту лидарную

систему для исследования атмосферного аэрозоля [10].

Согласно [10], исследования, проведенные на базе режима совместного функционирования наземного солнечного фотометра PLASMA, позволяющего определить такие показатели как оптическая плотность аэрозоля (AOD) и показатель Ангстрема и лидара CE 370, излучающего на длине волны 532 нм, позволили изучить многослойную структуру атмосферного аэрозоля, расположенную на высотах 0.6 км, (1.5 км – 1.8 км) и (3 км – 5 км). Вместе с тем, согласно [11], данные полученные с космического лидара CALIPSO оказываются полезными при проведении наземных лидарно-фотометрических исследований структуры атмосферного аэрозоля. Сообщается, что в ходе работ по усовершенствованию региональной модели COSMO – MUSCAT была проведена совместная обработка данных, полученных с лидарной сети измерений EARLINET, сети аэрозольных измерений AERONET и данные о профилях обратного рассеяния атмосферного аэрозоля, полученные с космического лидара CALIPSO. Очевидно, что лидарные системы как наземного, так и космического базирования, проходят первичные проверку и валидацию полученных данных при

проведении наземных измерений и разработка новых критериев эффективности функционирования лидарно-фотометрических систем актуальна также для бортовых (спутниковых) лидаров.

При калибровке лидаров малое отношение сигнал/шум, влияние облаков, а также потенциально ошибочные исходные оценки отношения коэффициента ослабления к коэффициенту рассеяния могут привести к ошибочному результату [3]. По этой причине для оценки погрешности измерения лидаров используются солнечные фотометры. Согласно работе [4], также возможен случай, когда многоканальные самолетные солнечные фотометры калибруются с помощью наземных лидаров при исследовании вертикального профиля атмосферного аэрозоля. Таким образом, лидарно-солнечно-фотометрические комплексы состоят из взаимодополняющих составных частей и эффективность работы таких комплексов обеспечивается эффективностью функционирования его отдельных подсистем. В настоящей статье изложены основы предлагаемого метода оценки эффективности таких комплексов. Общая схема лидарно-солнечно-фотометрического комплекса показана на рис. 1.

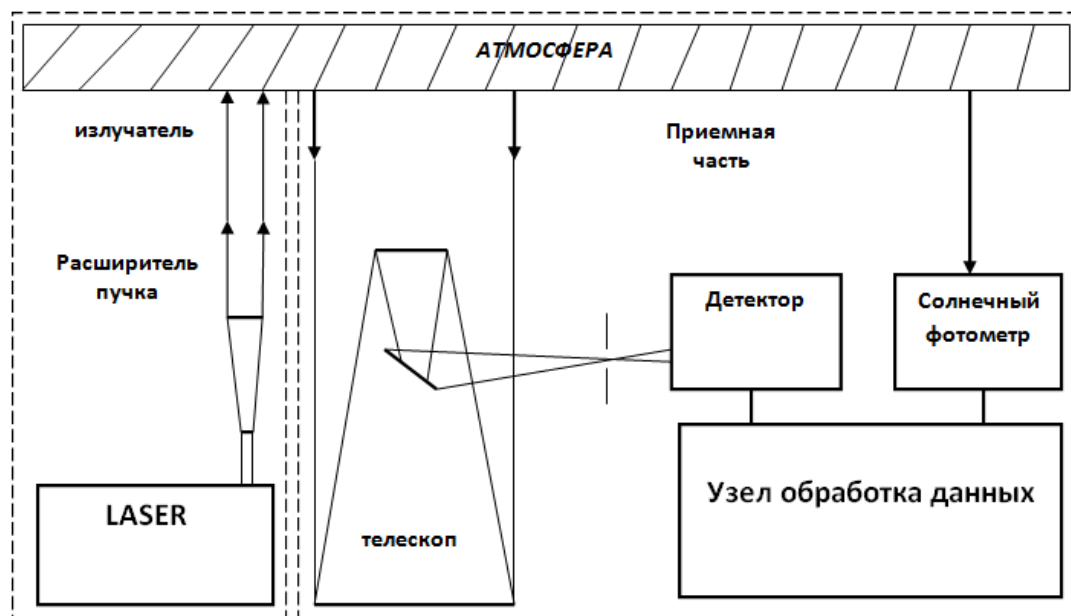


Рис. 1. Общая схема лидарно-солнечно-фотометрического комплекса атмосферных измерений

1 Теоретические основы предлагаемого метода

Согласно [12], луч лазера ослабляется из-за влияния двух компонентов атмосферы: молекул газов

и аэрозольных частиц. Основываясь на концепции однократного рассеяния луча лазера, лидарное уравнение можно записать в следующем виде:

$$P(r) = C \cdot \frac{[\beta_a(r) + \beta_m(r)] \cdot \exp \left\{ -2 \int_{r_0}^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr' \right\}}{(r - r_0)^2}, \quad (1)$$

где: $P(r)$ – мощность отраженного сигнала ли-
дара; C – постоянная лидара, прямо пропорцио-
нальная мощности лазера; r_0 – высота установки
лидара; $\beta_a(r)$ – коэффициент обратного рассеяния
аэрозольной частицы; $\beta_m(r)$ – молекулярный коэф-
фициент обратного рассеяния; $\alpha_a(r)$ – коэффициент
ослабления аэрозольной частицы; α_m – коэффици-
ент ослабления молекул газов; r – расстояние зон-
дирования; r' – текущее расстояние – переменная
интегрирования в пределах $(0 - r)$.

В первом приближении можно принять $\alpha_m(r) =$
 0 . Также согласно [13] $\beta_a(r) \ll \beta_m(r)$.

Согласно [12, 13], при вычислениях $P(r)$ отноше-
ние

$$S = \frac{\beta_a(r)}{\alpha_a(r)}$$

обычно рассматривается в качестве константы.
Однако, показатель S в реальности зависит от
нескольких параметров, таких как: распределение
аэрозольных частиц по размеру, по форме, по со-
ставу и может изменяться от 20 до 100, что в
конечном счете приводит к систематической по-
грешности. Для уменьшения этой погрешности с
помощью солнечного фотометра определяется опти-
ческая толщина аэрозоля, что позволяет соответ-
ствующую коррекцию проводимых измерений.

Согласно закону Бугера-Бера, на вход фотоме-
тра поступает оптический сигнал, вычисляемый по
формуле:

$$E_\lambda = E_{0,\lambda} \cdot \exp(-m\tau_\lambda) \cdot T_{g,\lambda},$$

где: E_λ – поток солнечного излучения на уровне по-
верхности земли; $E_{0,\lambda}$ – поток солнечного излучения
на уровне верхней границы атмосферы; m – оптиче-
ская воздушная масса, безразмерная величина; τ_λ –
суммарная оптическая толщина аэрозоля на длине
волны λ , безразмерная величина; $T_{g,\lambda}$ – оптическое
пропускание озона и водяных паров.

Вышеуказанные упрощения и замена оптиче-
ской толщины аэрозоля, измеренной лидаром, на
показатель τ_λ позволяет переписать формулу (1) в
виде (при $r_0 = 0$):

$$P(r) = \frac{C\phi(\beta_m, \tau_\lambda)}{r^2}, \quad (2)$$

где:

$$\phi(\beta_m, \tau_\lambda) = \beta_m(r) \cdot \exp\{-2 \cdot \tau_\lambda\}. \quad (3)$$

Таким образом, (2) является уравнением
лидарно-солнечно-фотометрического комплекса.

2 Предлагаемый метод оцен- ки эффективности лидарно- солнечно-фотометрического комплекса

С учетом выражений (1), (2) и (3) уравнение
лидарно-солнечно-фотометрического комплекса та-

кже может быть записано в виде:

$$P(r) \cdot C(r) = \frac{C^2(r) \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}{r^2}, \quad (4)$$

где: $C = C(r)$ – вновь вводимая функция зависи-
мости постоянной лидара (включающей мощность
лазера) от требуемого текущего расстояния r .

Эффективность лидарно-солнечно-фотометри-
ческого комплекса оценим следующим интеграль-
ным показателем, являющимся скалярным $P(r)$,
 $C(r)$:

$$\gamma = \int_0^{r_{\max}} P(r) \cdot C(r) dr, \quad (5)$$

где: r_{\max} – максимальная дистанция измерения.

Отметим, что ковариация $P(r)$, $C(r)$ с нулевыми
средними дает их скалярное (5).

Из выражений (4) и (5) получим

$$\gamma = \frac{\int_0^{r_{\max}} C^2(r) \phi(\beta_m, \tau_\lambda) dr}{r^2}. \quad (6)$$

Составим следующую оптимизационную задачу:
следует вычислить функцию $C(r)$, при которой γ
при некотором ограничительном условии, налагае-
мом на $C(r)$, достигла бы экстремального значения.
Ограничительное условие определим следующим
образом:

$$\int_0^{r_{\max}} C(r) dr = C_1; C_1 = const. \quad (7)$$

Условие (7) физически можно интерпретировать
как ограниченность энергоресурсов мобильного ли-
дара.

С учетом выражений (6) и (7) составим задачу
вариационной оптимизации. Целевой функционал
оптимизации имеет следующий вид:

$$\gamma = \frac{\int_0^{r_{\max}} C(r) \phi(\beta_m, \tau_\lambda) dr}{r^2} + \chi \int_0^r P(r) \cdot C(r) dr, \quad (8)$$

где: χ – множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи – функция
 $C = C(r)_{opt}$ должна удовлетворять условию [12]:

$$\frac{\partial \left\{ \frac{C^2(r)_{opt} \cdot \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}{r^2} + \chi \cdot C(r) \right\}}{\partial C(r)} = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) получим

$$\frac{2C(r)_{opt} \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}{r^2} + \chi = 0. \quad (10)$$

Из (10) находим

$$C(r)_{opt} = -\frac{\chi \cdot r^2}{2\phi(\beta_m, \tau_\lambda)}. \quad (11)$$

Из выражений (7) и (11) получаем

$$-\int_0^{r_{\max}} \frac{\chi \cdot r^2 \cdot dr}{2\phi(\beta_m, \tau_\lambda)} = C_1. \quad (12)$$

Из равенства (12) находим:

$$\chi = \frac{-C_1}{\int_0^{r_{\max}} \frac{r^2 dr}{2\phi(\beta_m, \tau_\lambda)}}. \quad (13)$$

Примем обозначение

$$\int_0^{r_{\max}} \frac{r^2 \cdot dr}{2\phi(\beta_m, \tau_\lambda)} = A. \quad (14)$$

При этом (13) перепишем как

$$\chi = \frac{-C_1}{A}. \quad (15)$$

С учетом (10) и (15) получим

$$\frac{2C(r)_{opt} \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}{r^2} = \frac{C_1}{A}, \quad (16)$$

из (16) находим

$$C(r)_{opt} = \frac{C_1 \cdot r^2}{2A \cdot \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}. \quad (17)$$

С учетом (14) и (17) окончательно имеем:

$$C(r)_{opt} = \frac{C_1 \cdot r^2}{2 \left[\int_0^{r_{\max}} \frac{r^2 dr}{2\phi(\beta_m, \tau_\lambda)} \right] \cdot \phi(\beta_m, \tau_\lambda)}.$$

Таким образом, при решении (17) целевой функционал (8) достигает экстремального значения. Проверка второй производной интегранта в (8) по функции $C(r)$ показывает, что этот экстремум является минимумом.

Так как, по сути критерий γ представляет собой скалярное умножение или ковариацию $P(r)$ и $C(r)$ с нулевыми средними, то предложенный критерий эффективности лидарно-фотометрической системы в оптимальном режиме работы должен достигать минимума. Это объясняется тем, что принимаемый сигнал в случае его максимальной информативности сильно отличается от зондирующего сигнала, т.е. между исходным зондирующим сигналом и принимаемым информативным сигналом имеется сильная отрицательная корреляция. Иначе говоря, эти сигналы сильно отличаются друг от друга. В предельном случае, если коэффициент корреляции равен минус единице, то эти сигналы можно представить в виде ортогональных сигналов, скалярное произведение которых по определению равно нулю.

Заключение

Таким образом, учитывая специфику работы комплекса дистанционного зондирования, состоящего из лидара и солнечного фотометра, предложен критерий эффективности функционирования таких систем. Этот критерий представляет собой ковариацию двух функций с нулевым средним: (а) выходного сигнала, в зависимости от дальности зондирования и (б) мощности излучения лазера, принятой в данной работе в качестве функции от указанной дальности. Предполагается, что лидарно-фотометрическая система является эффективной в том случае, если ковариация или скалярное произведение указанных функций без средних составляющих достигает минимума. Составлена соответствующая оптимизационная задача по схеме безусловной вариационной оптимизации при некотором интегральном ограничении на искомую функцию зависимости мощности лазера от расстояния зондирования. Решение оптимизационной задачи по методу Эйлера позволило получить оптимальный вид искомой функции, при которой принятый критерий эффективности достигает экстремума (минимума), что означает работу системы с максимальной эффективностью.

Изложенный материал может быть полезен для проектировщиков лидарных систем и специалистов, занимающихся их эксплуатацией.

Перечень ссылок

- [1] Shahzad M. I., Nicol J. E., Wang J., Campbell J. R., Chan P.W. (2013) Estimating surface visibility at Hong Kong from ground-based LIDAR, sun photometer and operational MODIS products. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 63, Iss. 9, pp. 1098-1110. DOI:10.1080/10962247.2013.801372.
- [2] Labzovski L. D., Papayannis A., Biniotoglou J., Banks R. F., Baldasonu J. M., Toanca F., Tzani C. G., Christodoulakis J. (2018) Relative humidity vertical profiling using lidar-based synergistic methods in the framework of the Hygra-CD campaign. *Annales Geophysicae*, Vol. 36, Iss. 1, pp. 213-229. DOI:10.5194/angeo-36-213-2018.
- [3] Lopes F. J. S., Landulfo E., Vaughan M. A. (2013) Evaluating CALIPSO 532 nm lidar ratio selection algorithm using AERONET sun photometers in Brazil. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 6, Iss. 11, pp. 3281-3299. DOI:10.5194/amt-6-3281-2013.
- [4] Karol Y., Tanre D., Goloub P., Vervaerde C., Balois L., Blarel L., Podvin T., Mortier A., Chaikovskiy A. (2013) Airborne sun photometer PLASMA: concept, measurements, comparison of aerosol extinction vertical profile with lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 6, Iss. 9, pp. 2383-2389. DOI:10.5194/amt-6-2383-2013.
- [5] Freville P., Montoux N., Baray J-L., Chauvigne A., Reveret F., Hervo M., Dionisi D., Payen G., Sellegri K. (2015) LIDAR Developments at Clermont-Ferrand — France for Atmospheric Observation. *Sensors*, Vol. 15, Iss. 2, pp. 3041-3069. DOI:10.3390/s150203041.

- [6] Yakovlev S., Sadovnikov S., Kharchenko O., Kravtsova N. (2020) Remote Sensing of Atmospheric Methane with IR OPO Lidar System. *Atmosphere*, Vol. 11, Iss. 1. DOI:10.3390/atmos11010070.
- [7] Donfrancesco Di G., Cairo F., Buontempo C., Adriani A., Viterbini M., Snels M., Morbidini R., Piccolo F., Cardillo F., Pommereu J-P., Garnier A. (2006) Balloonborne lidar for cloud physic studies. *Applied Optics*, Vol. 45., No. 22., pp. 5701-5708. DOI:10.1364/AO.45.005701
- [8] Larroza E. G., Nakaema W. M., Bourayou R., Horiaeau C., Landulfo E., Keckhut P. (2013) Towards an automatic lidar cirrus cloud retrieval for climate studies. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 6., Iss. 11, pp. 3197-3210. DOI:10.5194/amt-6-3197-2013.
- [9] Comeron A., Munoz-Porcar C., Rocadenbosch F., Rodriguez-Gomez A., Sicard M. (2017) Current research in Lidar technology used for the remote sensing of atmospheric aerosols. *Sensors*, Vol. 17, Iss. 6, 1450. DOI:10.3390/s17061450.
- [10] Popovici I., Goloub P., Podvin T., Blarel L., Loisel R., Mortier A., Deroo C., Ducos F., Victori S., Torres B. (2018) A mobile system combining Lidar and sunphotometer on – road measurements: description and first results. *EPJ Web of Conference*, Vol. 176. ILRC 28. DOI:10/1051/epjconf/201817608003.
- [11] Meier J., Mattis I., Tegen I., Muller D. (2009) Model initialization and validation with ground- and space- based lidar measurements and sun photometer measurements. *Proceeding of the 8th International Symposium on Tropospheric Profiling*.
- [12] Li J., Gong W., Zhu Z., Ma. Y. Active-passive optical remote sensing for weather and climate research. (2008) *CiteSeerX*.
- [13] Ionov P. I., Mollner A. K. (2015) Aerosol Optical Thickness Measurements with Elevation – Scanning Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 32., Iss. 7, pp. 1364-1371. DOI:10.1175/JTECH-D-14-00183.1.
- [14] El'cgol'ts L. E. (1974) Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie. [Differential equations and calculus of variations]. M.: Nauka, 432 p. [In Russian].

Підвищення ефективності функціонування лідарно-сонячно-фотометричних систем

Асадов Х. Г., Маммадова У. Ф.

Досліджено питання про оцінку ефективності функціонування лідарного-фотометричних систем. Лідарні системи як наземного, так і космічного призначення проходять первинні перевірку та валідацію отриманих даних при проведенні наземних вимірювань і формування нових критеріїв ефективності функціонування лідарно-фотометричних систем зберігає актуальність для всього підкласу систем лазерного зондування атмосфери.

Низька величина співвідношення сигнал/шум приймальних сигналів, вплив хмар, а також допущені помилкові вихідні оцінки відношення коефіцієнта ослаблення до коефіцієнта розсіювання можуть привести до

негативного результату. З цієї причини для зменшення похибки функціонування лідарів використовується їхня спільна робота з сонячним фотометром. У цій статті для комплексу дистанційного зондування, що складається з лідара і сонячного фотометра, запропоновано критерій ефективності функціонування, що представляє собою коваріацію двох функцій – (а) відбитого сигналу, в залежності від дальності зондування, і (b) потужності випромінювання лазера, прийнятої в даній роботі в якості функції від зазначеної дальності. Лідарно-фотометрична система початково вважається ефективною в тому випадку, якщо коваріація зазначених функцій досягає мінімуму, тобто зондуєчий і відбитий сигнали максимально різні. Сформульована оптимізаційна задача за схемою безумовної варіаційної оптимізації при деякому інтегральному обмеженні накладеному на шукачу функцію залежності потужності лазера від відстані зондування. Рішення оптимізаційної задачі за методом Ейлера дозволило отримати оптимальний вид шуканої функції, при якій прийнятий критерій ефективності досягає екстремуму (мінімуму), що означає роботу системи з максимальною ефективністю.

Ключові слова: лідар; ефективність; сонячний фотометр; комплекс; оптимізація

Increase of Lidar-Sun Photometer System Efficiency of Functioning

Asadov H. G., Mammadova U. F.

The question on evaluation of lidar-sun photometric system efficiency of functioning is researched. Lidar systems both the ground and space designation should pass initial check up and validation of derived data upon ground measurements. Formulation of new criteria of efficiency of functioning of lidar-sun photometric systems keeps its actuality for whole subclass of atmospheric laser sensing systems. Signal-noise low ratio value of received signals, clouds effects and allowed wrong initial estimates of attenuation and scattering factors ratio could lead to negative result. To decrease error of lidar functioning the joint operation of lidar with sun photometer is practiced. For complex of remote sensing composed of lidar and sun photometer the criterion of functioning efficiency that is covariation of two functions: (a) reflected signal, depending on distance of sensing and (b) laser irradiation power considered as function of said distance is suggested. The lidar-photometric system should be estimated as effective if covariation of said functions reaches minimum, that is sensing and reflected signals are completely different. The optimization task is formulated using procedure of non-conditional variation optimization upon some limitation condition imposed on searched function of laser power dependence on sensing distance. Solution of optimization task using Euler method make it possible to obtain the optimum type of the function upon which the adopted criterion of efficiency reaches minimum value that is system operates by maximum efficiency.

Key words: lidar; efficiency; sun photometer; complex; optimization