

Ю.С. Балин, С.И. Кавкянов, Г.М. Креков,
И.В. Самохвалов, С.В. Стрпетова

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ КОСМОСА

В работе исследуется информативность одночастотного бортового лидара при исследовании облачных полей и подстилающей поверхности из космоса. Рассматриваются методические вопросы интерпретации данных бортового лидара и принципиальные возможности использования этих данных в комплексе с пассивными методами. Проведен замкнутый численный эксперимент по определению оптических параметров слоисто-образных облаков и некоторых типов подстилающих поверхностей, иллюстрирующий перспективность использования одночастотного лидара в системах спутникового зондирования.

Основным видом информации об атмосфере и поверхности Земли, получаемой в настоящее время со спутников, являются фотографические и радиометрические изображения [1]. Активные методы дистанционного зондирования, в частности лазерная локация, не нашли еще должного приложения в этих исследованиях, хотя лидары позволяют получать информацию, недоступную для других методов [2]. В последние годы группами ученых разных стран изучаются перспективы использования лидаров в системах космического зондирования. Эти исследования посвящены в основном возможностям регистрации сигналов орбитального лидара, а также выработке требований к его техническим параметрам и режиму работы. Впервые проект космической лидарной станции, осуществляемый НАСА в рамках программы «*Shuttle Atmospheric Lidar Sistem*», был представлен группой американских ученых на 9-й Международной конференции по лазерному зондированию атмосферы [3, 4]. Среди первых из 26 намеченных экспериментов предполагается осуществить наиболее технически подготовленные измерения оптико-физических характеристик облачных образований и подстилающих поверхностей (ПП) одночастотным лидаром. Аналогичная программа сформирована также Европейским космическим агентством [5].

По-видимому, уже в ближайшие годы станет возможным получение информации об атмосфере и ПП с помощью орбитальных лидаров. В связи с этим важное значение приобретают вопросы интерпретации спутниковых лидарных измерений, включающие в себя методы извлечения полезной информации из данных лазерного зондирования, а также способы оптимального использования этих данных в комплексе с другими спутниковыми методами. Существует ряд работ в этом направлении, в которых путем замкнутого численного эксперимента исследуется точность зондирования аэрозольных и газовых профилей космическим лидаром [6–8]. В данной работе исследуется информативность одночастотного бортового лидара, работающего в аналоговом режиме приема. Именно такой лидар с использованием твердотельных излучателей предполагается использовать на первом этапе эксплуатации космических лидарных систем [3, 4].

1. Информационные возможности одночастотного бортового лидара

Возможности бортового лидара обусловлены, с одной стороны, спектром физических эффектов, определяющих процесс взаимодействия лазерного излучения с зондируемой средой, и с другой стороны — техническими возможностями регистрации этих эффектов. Наиболее энергетически выраженными являются процессы упругого рассеяния на аэрозолях и отражения от ПП, что важно при зондировании с борта космического аппарата (КА) ввиду больших (сотни км) дистанций зондирования.

Вообще говоря, даже при использовании одночастотного лидара (без регистрации изменения спектрального состава рассеянного излучения по сравнению с падающим) возможно решение широкого круга прикладных задач. Одночастотный лидар позволяет регистрировать пространственно-временную структуру некоторых оптических параметров атмосферы и ПП. Это, в первую очередь, дальность и коэффициенты отражения ПП и облаков (пропорциональные соответственно альбедо и значению индикатрисы рассеяния назад), а также высотные профили коэффициентов рассеяния (поглощения). Как показывают модельные расчеты, при использовании аналогового режима приема и бортового лидара со средними параметрами возможна регистрация сигналов лишь от достаточно плотных атмосферных образований и ПП. Таким образом, наибольшего эффекта от использования рассматриваемого лидара можно ожидать в следующих задачах:

а) Идентификация типа рассеивающего объекта, например, различение облаков на фоне ПП, когда это невозможно сделать с использованием фотометрических и радиометрических изображений (при близких альбедо ПП и облачности);

б) Определение верхней границы облачности (ВГО), необходимой в задаче термического зондирования. Известные методы определения ВГО с помощью инфракрасных радиометров обладают низкой точностью и малой чувствительностью к неплотным облакам [9];

в) Исследование многоярусной структуры неплотной облачности оптических параметров верхней кромки плотных облаков. Эта информация необходима для интерпретации данных термического зондирования и обработки спутниковых снимков;

г) Исследование статистической структуры и оптических параметров ПП, в частности, уровня и характеристик взволнованности поверхности океана, коэффициентов отражения ПП, некоторых гидрооптических параметров приповерхностного слоя воды.

К перечисленным возможностям следует добавить, что лидары позволяют производить измерения в любое время суток с высоким разрешением по горизонтали и вертикали. В то же время имеются определенные трудности принципиального характера, не позволяющие решать задачи спутникового зондирования только лидарными методами. Это в первую очередь ограниченность энергетических ресурсов бортового лидара, что не дает возможности достичь желаемой пространственной плотности наблюдений. В этом отношении несомненным преимуществом обладают пассивные методы, лидарные же измерения можно комплексировать с ними в некоторых реперных точках.

2. Интерпретация данных бортового лидара

Общая схема обработки лидарных сигналов при зондировании с борта КА должна включать в себя решение задач фильтрации (выделение полезного сигнала на фоне помех и устранение аппаратных искажений), классификации (распознавание типа зондируемых объектов) и оценивания параметров облачности и ПП. Рассмотрим последовательно эти задачи.

а) **Ф и л ь т р а ц и я**. Этот этап обработки лидарных сигналов наиболее универсален, требует минимума априорной информации о физическом состоянии объекта и легко автоматизируем. Его необходимость обусловлена, во-первых, стремлением максимально ослабить случайные помехи фоновой и аппаратного происхождения, во-вторых, устранить аппаратные искажения полезного (оптического) сигнала, существенно затрудняющие интерпретацию. Дело в том, что лидарные сигналы от плотных облаков и ПП обладают весьма малой длительностью, сравнимой с длительностью излучаемого импульса, а приемный тракт лидара обладает ограниченной полосой пропускания. Это приводит к уширению лидарного сигнала, обратно пропорциональному его длительности, и искажению временной структуры сигналов. Рис. 1, а иллюстрирует искажения модельного лидарного сигнала $s(t)$ при прохождении через линейную систему с передаточной функцией $H(f) = \text{const} \cdot \exp(-f^2/2F^2)$, где f — частота; F — полоса пропускания системы на уровне $1/\sqrt{2}$. Отметим, что полоса пропускания реальных лидарных приемников $F \sim 10$ МГц. Поскольку передаточную функцию лидарных систем достаточно легко измерить, рассмотренные искажения можно устранить путем цифровой фильтрации. На рис. 1, б показаны результаты обратной фильтрации (восстановления) лидарного сигнала $s(t) [1 + v(t)]$, где v — случайная помеха, равномерно распределенная в интервале $[0, 1]$. Использовался алгоритм винеровской фильтрации [10] с адаптивной подстройкой его параметров по приведенной на рисунке реализации сигнала [11].

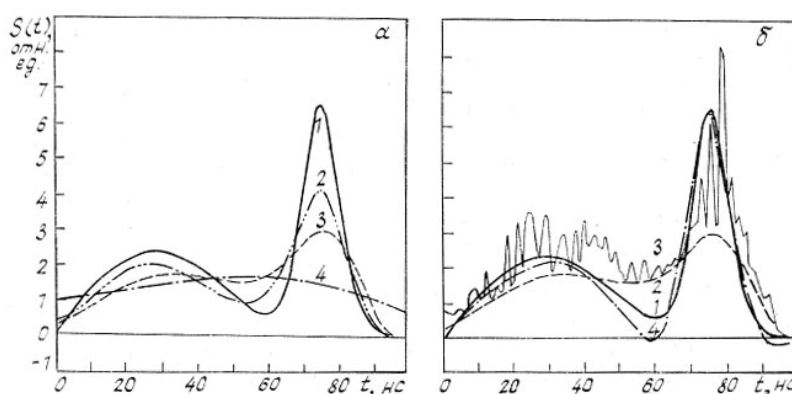


Рис. 1. а) Влияние ограниченности полосы пропускания F приемного тракта лидара на форму лидарного сигнала. 1 — исходный сигнал $s(t)$; 2, 3, 4 — искаженные сигналы при $F = 50$ МГц, 25 МГц и 10 МГц соответственно, б) Результаты адаптивной обратной фильтрации искаженного сигнала. 1 — модельный сигнал; 2 — искаженный сигнал $s(t)$ при $F = 25$ МГц; 3 — сигнал $s(t) [1 + v(t)]$; 4 — результат его обработки

б) **К л а с с и ф и к а ц и я**. Этот этап необходим в силу того, что интерпретация данных бортового лидара без привлечения априорной информации (независимых измерений) может оказаться неоднозначной. В частности, одиночный импульс может быть обусловлен отражением от ПП либо от облака, после-

довательность импульсов — отражениями от многоярусной облачности, либо от облачности и ПП, и т.д. В силу высокой изменчивости оптических свойств системы «атмосфера — ПП» существует вполне определенная вероятность принятия ложного решения о типе рассеивающего объекта. Вполне очевидно, что дальнейшая интерпретация (оценивание параметров объекта) приведет при этом к абсурдным результатам.

Для построения алгоритмов классификации необходимо, прежде всего, определить существенные признаки лидарных сигналов, достоверно характеризующие зондируемые объекты. Классификацию можно осуществлять с использованием статистической априорной информации о зондируемых параметрах облачности и ПП либо путем самообучения (использования информации, полученной из предыдущих измерений). Для обеспечения надежной классификации необходимо выбирать минимальное количество информативных параметров сигнала и обеспечивать их максимальную независимость. Многие параметры лидарного сигнала, такие, как длительность импульса, максимальная амплитуда, энергия, и другие, являются взаимосвязанными и зависящими в итоге от небольшого числа физических параметров зондируемой среды. Сказанное иллюстрирует рис. 2, на котором показано изменение формы лидарного сигнала $s(z)$ в зависимости от градиента $k = d\sigma/dz$ в верхней кромке слоистообразного облака (использовалась параметрическая модель $\sigma(z)$ в облаке из [12], где σ — коэффициент рассеяния, расстояние z отсчитывается от верхней кромки облака вниз). Очевидно, характер изменения длительности переднего фронта импульса такой же, как и длительности всего импульса, так что достаточно ограничиться первым из этих параметров. Другим информативным параметром является дальность z_0 до зондируемого объекта (либо координата z_1 первого вступления — см. рис. 2, а). Третий параметр, который удобно использовать при классификации, — интегральное значение I лидарного сигнала, домноженного на квадрат расстояния z . Этот интеграл с точностью до постоянной пропорционален коэффициенту отражения при зондировании ПП либо значению индикатрисы рассеяния назад при зондировании атмосферы. Перечисленные параметры лидарного сигнала содержат практически всю информацию о зондируемом объекте, которую удастся получить при одночастотном зондировании. Для получения более полных данных о состоянии объекта можно использовать спектральные и поляризационные эффекты, которые здесь не рассматриваются.

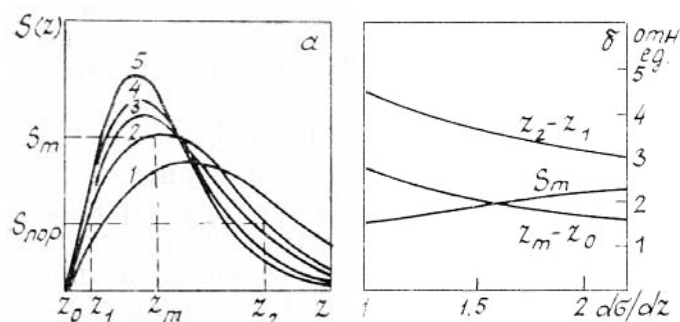


Рис. 2. а) Изменение формы лидарного сигнала $s(z)$ в зависимости от градиента оптических свойств облака $k = d\sigma/dz$. Кривые 1–5 получены при последовательном увеличении k от 1 до 2. б) Зависимость некоторых информативных параметров лидарного сигнала от градиента k

в) Оценивание параметров. Выбранные выше параметры несут информацию о физическом состоянии объекта исследования, так что их значения, оцененные по экспериментальным данным, представляют самостоятельный интерес для задач метеорологического зондирования. В частности, это высота ВГО (уровень ПП) и коэффициент отражения облаков и ПП. Третий параметр — длительность $z_m - z_0$ переднего фронта импульса — имеет физический смысл только при отражении от облаков. В предположение линейного нарастания $\sigma(z)$ этот параметр однозначно связан с градиентом

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{2(z_m - z_0)^2} = \ln \left(\frac{z_2 - z_0}{z_1 - z_0} \right) [(z_2 - z_0)^2 - (z_1 - z_0)^2]^{-1}.$$

Устойчивую оценку этого параметра можно получить по методу наименьших квадратов:

$$\frac{\hat{d\sigma}}{dz} = \int_{z_1}^{z_2} \ln \left(\frac{z - z_0}{z_m - z_0} \frac{s(z_m)}{s(z)} \right) [(z - z_0)^2 - (z_m - z_0)^2] dz \left\{ \int_{z_1}^{z_2} [(z - z_0)^2 - (z_m - z_0)^2]^2 dz \right\}^{-1},$$

а из двух последних уравнений можно оценить z_0 (обозначения те же, что на рис. 2), что целесообразно производить при высоком уровне шума (большом пороговом значении $s_{пор}$ — см. рис. 2). Точность разработанных алгоритмов оценивания $d\sigma/dz$, z_0 исследовалась в модельных расчетах. Рас-

сма тривались два варианта: восстановление $\frac{d\sigma}{dz}$, z_0 по измерениям z_1, z_m и отношению $s_m/s_{\text{пор}}$, а также по измерениям только z_1, z_m, z_2 . Погрешность восстановления (на 1 % погрешности входных данных) представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Вариант обработки	I вариант			II вариант		
	z_1	z_m	$s_m/s_{\text{пор}}$	z_1	z_m	$s_m/s_{\text{пор}}$
δz_0	0,08	1	1	0,46	1	20
δk	0,15	2	0,12	0,18	2	3,3

Очевидно, наихудшая устойчивость наблюдается к измерениям длительности заднего фронта импульса $z_2 - z_m$. Учитывая, что эта часть лидарного сигнала является также наиболее искаженной за счет помехи многократного рассеяния, можно дать рекомендацию об использовании при интерпретации только переднего фронта лидарного сигнала (если не производится компенсации многократного рассеяния с помощью какой-либо его аппроксимации [13]).

Полученное по методу наименьших квадратов значение градиента k можно использовать для вычисления среднего профиля $\bar{\sigma}(z) = \kappa(z - z_0)$ в верхней кромке облака и дальнейшего использования σ в качестве опорного для получения более детального профиля $\sigma(z)$ по методикам [13]. Здесь эту задачу мы не рассматриваем.

3. Численный эксперимент

В целях исследования информативности лазерного зондирования облаков и ПП из космоса проведен замкнутый численный эксперимент. Рассматривалась задача идентификации типа отражающего объекта по данным одночастотного бортового лидара. Известно, что интерпретация космических снимков затруднена тем, что двумерное изображение не позволяет достоверно распознавать природные образования, в связи с чем приходится использовать разного рода косвенные критерии, не обеспечивающие надежной идентификации [14]. Использование в этих целях лидарных методов с присущей им трехмерностью получаемых данных (благодаря селекции зондируемых объектов по дальности) позволяет существенно повысить достоверность распознавания, что иллюстрируется табл. 2. В ней приведены в процентах ошибки распознавания ледовой, водной и облачной поверхностей при использовании в качестве информативных параметров:

Т а б л и ц а 2

Тип природного образования	Информативные параметры		
	а	б	в
Лед	32	1	1
Вода	45	31	21
Облако	73	33	3

а) только коэффициента отражения (что примерно соответствует распознаванию по яркости на космических фотоснимках при нахождении Солнца в зените);

б) коэффициента отражения и длительности переднего фронта отраженного импульса;

в) перечисленных параметров и дальности до зондируемого объекта.

Численный эксперимент проводился методом статистических испытаний. Моделировались серии случайных реализаций параметров среды (для каждого типа образований), затем рассчитывались соответствующие реализации лидарных сигналов, по которым вычислялись информативные параметры по алгоритмам п. 2, и проводилась классификация. Использовался байесовский классификатор. Распределения основных параметров задавались нормальными и соответствующими среднему коэффициенту отражения 0,1 — для воды; 0,2 — для облака; 0,5 — для льда. Использовалась однородная модель водной толщи, модель слоистой облачности [12] со средней мощностью 0,5 км. Среднее расстояние до зондируемого объекта задавалось 300 км со стандартным отклонением 300 м (в случае воды и льда) и 295 км со стандартным отклонением 5 км (для облака). Коэффициенты вариации остальных перечисленных параметров полагались равными 50%. Априорные вероятности гипотез предполагались равными.

Таблица 3

Вариант обработки	а)	б)	в)
Без фильтрации	4	100	95
С использованием обратной фильтрации	0	0	0

Исследование различных методов обработки лидарных сигналов проводилось на примере задачи распознавания гипотезы «облако — ПП». Параметры среды выбирались таким образом, чтобы обеспечить безошибочную классификацию. Рассчитанные согласно этим параметрам реализации лидарных сигналов «пропускались» через линейную систему с гауссовой передаточной функцией. Полоса пропускания приемника принималась $F = 25$ МГц, длительность зондирующего импульса $\tau = 10$ нс. В табл. 3 приведены ошибки распознавания (в процентах) при использовании двух вариантов обработки: по алгоритму, изложенному в п. 2, и по упрощенным алгоритмам, без предварительной фильтрации сигналов. В качестве информативных признаков выбраны следующие измеряемые на практике параметры:

- а) дальность до зондируемого объекта;
- б) длительность переднего фронта импульса;
- в) перечисленные в пунктах а) и б) параметры и энергия отраженного импульса.

Необходимо отметить, что проведенный численный эксперимент даже в общих чертах не охватывает всех возможных ситуаций, возникающих при интерпретации данных спутникового зондирования. Он носит чисто иллюстративный характер и имеет целью лишь качественно показать повышение достоверности распознавания с привлечением данных лазерного зондирования. Более подробное исследование точности лидарных методов требует расширения числа используемых гипотез, детального описания оптических свойств идентифицируемых объектов, применения оптимальных алгоритмов обработки и др. Тем не менее проведенный анализ позволяет сделать вывод о значительном увеличении информативности спутниковых исследований системы «атмосфера — Земля» при использовании орбитального лидара.

1. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 351 с.
2. Лазерный контроль атмосферы /Под редакцией Э. Д. Хинкли. — М.: Мир, 1979. — 416 с.
3. Browell E. W. — 9th International Laser Radar Conference, Munich, FRG, 1979, p. 176.
4. Harris J.E., Greco R.V. — 9th International Laser Radar Conference, Munich, FRG, 1979, p. 178.
5. Renger W., Endemann M., Qunzel H., Werner Ch. — 13th International Laser Radar Conference, Canada, 1986, p. 10.
6. Russel P. B., Morley B. M., Livingston J. M. et al. — Improved Simulations of Aerosol, Cloud and Density Measurements by Shuttle Lidar. — NASA Contractor Report, 3473, 1981, p. 160.
7. Zuev V.E., Kavkyanov S.I., Krekov G.M. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, № 6, p. 81.
8. Зуев В.Е., Иваненко Б.П., Наац И.Э. — Исследование Земли из космоса, 1985, № 5, с. 117.
9. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. — М.: Наука, 1973, с. 303.
10. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. — М.: Сов. радио, 1979, с. 272.
11. Кавкьянов С.И. — ДАН СССР, 1987, т. 293, с. 1353.
12. Радиация в облачной атмосфере /Под ред. Е. М. Фейгельсон. — Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 280.
13. Креков Г.М., Кавкьянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1987, с. 185.
14. Аржаненко Н.И., Бондур В.Г. — В кн.: Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1987, с. 208.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, г. Томск

Поступила в редакцию
23 сентября 1987 г.

Yu.S. Balin, S.I. Kavkyanov, G.M. Krekov, I.V. Samokhvalov, S.V. Strepetova.
On laser sounding of clouds and underlying surface from space.

The paper deals with the results of investigation of information content of airborne single-frequency lidar when investigating the cloud fields and underlying surface from the outer space. The methodical questions of interpreting the data of airborne lidar and principal possibilities of these data use are considered combined with the passive methods. The closed numerical experiment on determining the optical parameters of stratus and some types of underlying surfaces has been carried out. The above experiment illustrates the perspectives of application of a single-frequency lidar in the systems of spaceborne sounding.