

С.В. До, Ю.М. Андреев, И.А. Разенков, И.В. Шерстов, Н.А. Шефер, Х.Д. Конг, Ё.Д. Пак,

**НАСТРОЙКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ИК ДПР ЛИДАРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

Описан способ настройки оптических трактов и тестирования лидаров с помощью сопоставления реальных эхосигналов и сигналов, рассчитанных с помощью специальной компьютерной программы «GF₁», предназначенной для инженерных расчетов. Приведены результаты настройки оптического тракта и тестирования инфракрасного лазерного локатора дифференциального поглощения и рассеяния, изготовленного Институтом оптики атмосферы СО РАН, Россия, г. Томск, по заказу Корейского института передовой науки и технологии, Республика Корея, г. Тэйджон.

Любой лазерный локатор представляет собой сложное электронно-оптическое устройство [1], настройка которого определяется целым рядом параметров. Наибольшую трудность вызывает настройка оптического тракта, которая на практике начинается с получения какого-либо лидарного эхосигнала, а затем экспериментаторы добиваются его оптимизации по временной форме в соответствии с решаемой задачей.

Наш подход к изготовлению и настройке лидара заключается в следующем. Прежде всего, созданию лидара предшествует этап инженерного проектирования. Далее, после изготовления прототипа лидара, проводится всестороннее исследование реальных зависимостей амплитуды и длительности (формы) регистрируемых сигналов от взаимного положения и настройки узлов оптического тракта лидара. Производится оптимальная настройка оптического, а затем электронного лидара и, наконец, параллельно сравниваются полученные экспериментальные данные и результаты теоретических оценок, проведенных по программам, разработанным на этапе инженерного проектирования, но с учетом реальных текущих параметров оптического тракта лидара и состояния атмосферы.

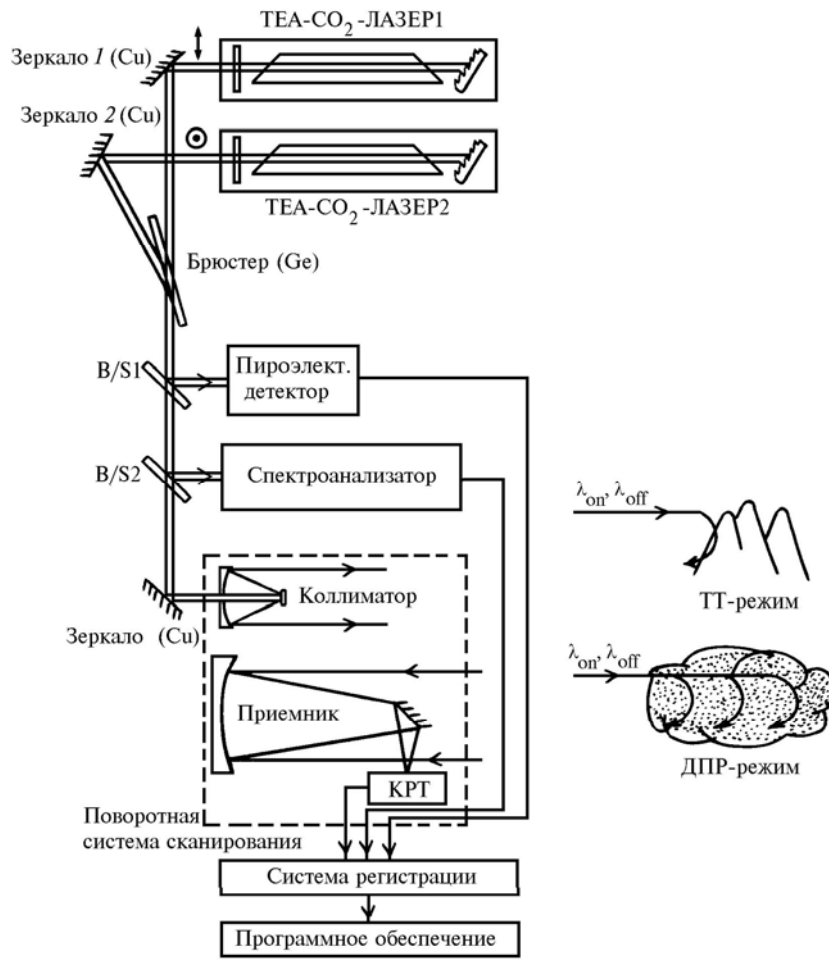
В качестве первичной экспериментальной информации для проведения сравнения может быть использован лидарный сигнал обратного рассеяния, форма которого определяется геометрической функцией приемопередатчика и искомыми параметрами атмосферы, либо собственно определенный параметр атмосферы. Чтобы исключить влияние методических погрешностей в определении искомого параметра атмосферы из лидарного сигнала с использованием уравнения локации и какого-либо математического метода, авторы отдают предпочтение использованию лидарных сигналов.

Данный подход был апробирован при изготовлении и настройке мобильного инфракрасного (ИК) лидара дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) на основе двух импульсных ТЕА СО₂-лазеров. Лидар предназначен для контроля газового состава атмосферы в полевых условиях и является прототипом коммерческого полевого газоанализатора. Лидар работает в режиме переключения как трассовый измеритель с использованием топографических целей в качестве отражателей (ТТ-режим) и в режиме дистанционных измерений с использованием атмосферного аэрозоля в качестве распределенного отражателя (ДПР-режим). Основные технические характеристики лидара приведены ниже.

Параметры ИК ДПР лидара

<i>Передатчик (телескоп Кассегрена):</i>		<i>Приемник (телескоп Ньютона):</i>	
Диаметр телескопа, мм	260	Диаметр телескопа, мм	500
Длина волны, мкм	9 – 11	Фокусное расстояние, мм	1490
Энергия импульса, Дж	1 – 4	Поле зрения полное, мкрад	670
Расходимость полная, мрад	1		
<i>Регистратор:</i>		<i>Детектор (фотодиод):</i>	
Разрядность АЦП, бит	12	Тип	HgCdTe
Частота дискретизации, МГц	10	Размер площадки, мм ²	2×2
		Обнаружительная способность, (см · Гц ^{1/2})/Вт	2 · 10 ¹⁰

Лазеры с длиной резонатора 1,5 м работали в многомодовом режиме генерации с размерами выходного пучка излучения $27 \times 17 \text{ мм}^2$, который диафрагмировался внутрирезонаторно, при необходимости, до пучка $\varnothing 15 \text{ мм}$. Распределение энергии в поперечном сечении, определенное методом ожогов, было достаточно однородным.



a



б

Рис. 1. Оптическая схема (а): B/S1 и B/S2 – BaF_2 делительные пластинки, КРТ-фотодиод кадмий–ртуть–теллур и внешний вид (б) ИК ДПР лидара

Оптическая схема изготовленного прототипа лидара показана на рис. 1,а, а его внешний вид на рис. 1,б. Заметим, что в кабине (см. рис. 1,б) кроме лидара смонтирован еще и трассовый атмосферный газоанализатор, который виден с торца кабины. Поворотная приемопередающая часть лидара находится на крыше кабины.

Основной особенностью оптической схемы лидара является управляемость всех основных ее параметров: расстояния между осями приемного и передающего телескопов, угла схождения их осей, размера полевых диафрагм и/или чувствительной площадки фотоприемников и т.д. Зондирующее излучение на выходе коллиматора фокусируется на расстоянии до 3 км или дефокусируется до полной расходимости ≤ 1 мрад.

Инженерное проектирование и последующее компьютерное сравнение полученных и ожидаемых сигналов производилось с помощью программы «GF₁», описанной в [2]. Данная программа позволяет рассчитать геометрическую функцию лидара при вариациях всех основных параметров оптико-механического тракта лидара любой конструкции, форму лидарных сигналов с учетом метеорологического состояния атмосферы, ее газового и аэрозольного состава, параметров используемых лазерных источников излучения, фотоприемников, электронной системы регистрации и обработки сигналов.

Регистрация формы экспериментальных лидарных сигналов производилась с помощью изготовленной системы регистрации на основе 12-разрядного АЦП AD872, предусилителя AD844 и усилителя AD600 фирмы Analog Devices США с коэффициентом усиления, управляемым напряжением. В зависимости от состояния и состава атмосферы общий коэффициент усиления выбирался в пределах 100÷1000. Регистрация производилась также с помощью цифрового запоминающего осциллографа Tektronics TDS644A с полосой 0,5 ГГц и памятью на магнитном диске. Во всех случаях регистрировались также все параметры опорных сигналов. В качестве фотоприемника канала использовался КРТ-фотодиод С964 фирмы EG&G Judson, США, с приемной площадкой 2×2 мм² либо отечественный КРТ-фоторезистор. В опорном канале использовался, после соответствующего ослабления пучка, недоохлажденный КРТ-фоторезистор с площадкой 1×1 мм². Параметры всех фотодетекторов были тщательно исследованы путем сравнения их отклика и отклика Ge:Аu фотодетектора с увлечением носителей с постоянной времени около 2 нс. Уровень входных сигналов фотоприемников и усилителей, их режимы работы исключали искажение формы регистрируемых сигналов. Постоянные времени всех КРТ-фотоприемников лежали в пределах 8÷10 нс.

Таким образом, обеспечивалась возможность корректного определения семейства зависимостей параметров лидарных сигналов от взаимного расположения и настройки оптико-механических узлов лидара в масштабе реального времени, а следовательно, возможность выявить характер влияния юстировок на лидарный сигнал и тенденцию настройки лидара в целом, сравнить ее результаты с потенциально реализуемыми для данного лидара и в итоге – произвести действительно оптимальную настройку. Параметры оптимально настроенного лидара, в свою очередь, оказывается возможным сравнить с потенциальными параметрами других известных лидаров и, таким образом, оценить уровень разработки в целом.

В качестве иллюстрации приведем промежуточные результаты по настройке и отладке вышеупомянутого лидара.

На рис. 2 представлены результаты тестирования при изменении расходимости зондирующего излучения, которая осуществлялась расстройкой коллиматора системы Кассегрена, удаленной от лазера на расстояние 5,6 м, путем изменения расстояния между его зеркалами. Размер контротражателя составлял 80 мм.

На рис. 2,а показано семейство рассчитанных сигналов для различных расходимостей зондирующего пучка при одномодовом режиме работы лазера – гауссовской форме распределения энергии в его поперечном сечении. На рис. 2,б представлено семейство кривых для равномерного распределения энергии (приближение к многомодовому режиму работы лазера). На рис. 2,в изображено соответствующее семейство экспериментальных кривых, снятых без использования диафрагмирования пучка лазера и определенной расходимости выходного пучка, равной 15 мрад.

Сравнение всех трех частей рис. 2 показывает, что поведение сигналов в зависимости от расстройки коллиматора не является соответствующим поведению пучков ни с чисто гауссовским распределением энергии, ни с чисто равномерным. Тем не менее реальное распределение все же ближе к гауссовскому.

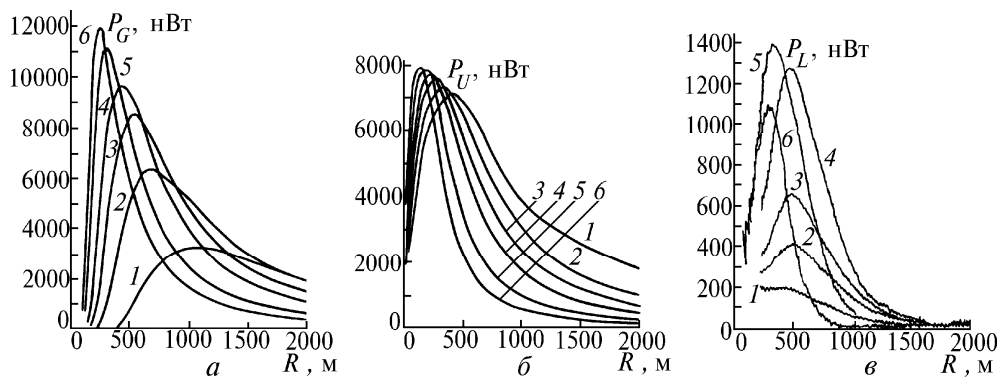


Рис. 2. Зависимость формы лидарного эхосигнала от расходимости излучения лазера. Теоретические кривые для распределения Гаусса (а) (1 – 0,4; 2 – 0,6; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,4; 6 – 1,8 мрад) и равномерного (б) распределения (1 – 0,4; 2 – 0,6; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 1,4; 6 – 1,8 мрад). Экспериментальные кривые (в) (1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 0,8; 4 – 0,9; 5 – 1,2; 6 – 1,4 мрад)

Если охарактеризовать работу приемопередающей системы в целом, то следует отметить два факта: низкую общую эффективность и резкий спад сигнала с расстояний порядка 1 км.

Дальнейший анализ показал, что резкий спад сигнала обусловлен более высокой, около 20 мрад, реальной расходимостью лазера, некорректно определенной методом ожогов из-за низкоинтенсивной части пучка излучения. Использование полевых диафрагм, отсекающих эту часть пучка, привело в соответствие расчетные и экспериментальные зависимости. Эффективность приемопередающей системы увеличена за счет уменьшения диаметра контррассеивателя и центрального отверстия основного зеркала коллиматора устранением вспомогательных (настроечных) оптических элементов на время измерений, совмещения функций используемых оптических элементов, установкой пылезащитных устройств и т.д.

По окончании этого этапа настройки и использования усилителя получены сигналы обратного рассеяния с расстояния до 3 км с отношением сигнал-шум, равным до 1000 за одну пару выстрелов. Эффективность системы была увеличена почти втрое.

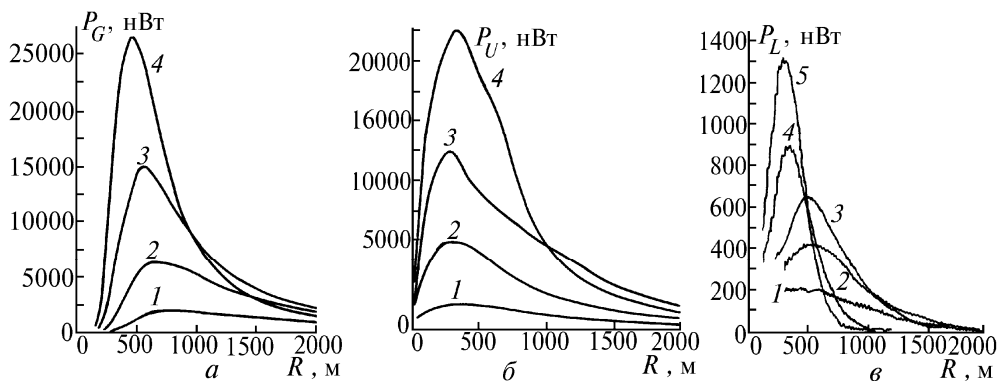


Рис. 3. Зависимость лидарного эхосигнала от схождения оптических осей передатчика и приемника. Теоретические кривые для распределения Гаусса (а) (1 – -0,25; 2 – 0; 3 – +0,25; 4 – +0,5 мрад) и равномерного (б) распределения (1 – -0,5; 2 – 0; 3 – +0,5; 4 – +1,0 мрад). Экспериментальные кривые (в) (1 – -0,25; 2 – 0; 3 – +0,25; 4 – +1,0; 5 – +1,5 мрад)

Исследование зависимости формы эхосигнала от угла схождения оптических осей передатчика и приемника на первом этапе настройки производилось путем поворота плоского эллиптического зеркала телескопа Ньютона с помощью микровинта. На рис. 3 показаны соответствующие зависимости формы лидарного сигнала для теоретических пучков, имеющих распределение интенсивности по сечению в виде кривой Гаусса (а) и равномерное (б). На рис. 3,в приведены соответствующие экспериментальные кривые. Как и прежде, характер изменения формы сигнала в зависимости от расстройки выбранного параметра указывает на гауссовскую форму пучка. В качестве оптимального значения угла схождения осей может быть выбрана величина порядка +0,25 мрад, при которой точка пересечения оптических осей передатчика и приемника располагается на удалении 1500 м от лидара.

Выбор положения площадки фотодетектора относительно фокуса приемного телескопа также оказывается важным. Дело в том, что рассеянное вблизи от лидара излучение фокусируется приемным телескопом за фокальной плоскостью. Небольшая ошибка в установке детектора может привести к заметному ослаблению сигнала. Установка детектора перед фокусом телескопа приводит к уменьшению сигнала в целом. Установка детектора за фокальной плоскостью может привести к увеличению сигнала от ближней зоны лидара и резкому ослаблению в дальней зоне. Оптимальным смещением детектора для данной конструкции лидара следует считать сдвиг 1–2 мм за фокальную плоскость.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемый способ настройки лидаров позволяет экспериментатору не работать «вслепую», а ориентироваться на модельные сигналы, рассчитанные в соответствии с параметрами создаваемой лазерной системы.

2. Этот метод позволяет выявлять несоответствие реальных параметров узлов лидара по сравнению с тем, что было заложено в его конструкцию на этапе разработки.

3. Проведенное тестирование действующего локалатора показало на практике работоспособность методики и позволило в реальных условиях добиться результатов, близких к тем, которые предполагалось получить с помощью данной конструкции лидара.

В заключение отметим, что анализ всех полученных теоретических и экспериментальных кривых указывает на сложную зависимость формы сигнала от того, как настроен локалатор и насколько качественно спроектированы и изготовлены его узлы. Кроме того, компьютерное тестирование позволяет предсказать и правильно указать, куда именно следует направить основные усилия для оперативного получения удовлетворительных результатов.

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

2. Разенков И. А., Андреев Ю. М., Шефер Н. А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1423–1427.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 декабря 1995 г.

S. V. Do, Yu. A. Andreev, I. A. Razenkov, I. V. Sherstov, N. A. Shefer, K. H. D. Kong, Jo. D. Pak. **Computerized Adjustment and Testing of IR DAS Lidars.**

The computerized adjustment of optical channels and testing of IR DAS lidars by comparison of realistic echo-signals and the signals computed with specialized program «GF1» are described. The results are presented for the lidar produced at the Institute of Atmospheric Optics of SB RAS (Tomsk) under order of the Korean Institute of Advanced Science and Technology.