

УДК 551.46.08

© В. А. Глухов^{1,3}, Ю. А. Гольдин², М. А. Родионов¹¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва³Санкт-Петербургский государственный университет

vl.glukhov@inbox.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛИДАРА ПЛД-1 ПО РЕГИСТРАЦИИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ТОЛЩЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Статья поступила в редакцию 18.05.2017, после исправления 26.05.2017.

Разработан новый морской поляризационный лидар ПЛД-1, предназначенный для решения задач, связанных с определением пространственной структуры полей гидрооптических характеристик, а также регистрации и определения положения объектов, расположенных в толще морской воды. В качестве источника зондирующего излучения в ПЛД-1 используется в твердотельный импульсный лазер на АИГ:Nd с диодной накачкой. Приведены особенности конструкции и основные технические характеристики лидара. Представлены некоторые результаты первых натурных экспериментов, выполненных в прибрежных водах Черного моря. В ходе этих экспериментов были уверенно зарегистрированы эхо-сигналы от плоской и сферической мишеней при протяженности подводного участка трассы зондирования более чем в двое превышающим глубину видимости белого диска Zб. Продемонстрировано преимущество поляризационного метода локации погруженных объектов с регистрацией кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала.

Ключевые слова: морской поляризационный лидар, дистанционное зондирование, оптические неоднородности, локация мишеней.

V. A. Glukhov^{1,3}, Yu. A. Goldin², M. A. Rodionov¹¹Saint-Petersburg Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia²P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia³Saint-Petersburg State University, Russia

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE CAPABILITIES OF THE LIDAR PLD-1 FOR THE REGISTRATION OF VARIOUS HYDRO-OPTICAL IRREGULARITIES OF THE SEA WATER COLUMN

Received 18.05.2017, in final form 26.05.2017.

A new marine polarization lidar PLD-1 was developed. It was designed for determine the spatial structure of the fields of hydrooptical characteristics, as well as recording and determining the position of objects in the seawater column. A solid-state pulsed YAG: Nd laser with diode pumping is used as a source of sounding radiation. The design features and the main technical characteristics of the lidar are given in the paper. Some results of the first full-scale experiments performed in the coastal waters of the Black Sea are presented. During these experiments, echo-signals from the flat and spherical targets were confidently recorded with the length of the underwater portion of the sounding path more than two times longer than the depth of visibility of the Secchi disk Zb. The advantage of the polarization method for locating immersed objects with registration of the cross-polarized component of the echo-signal is demonstrated.

Key words: marine polarization lidar, remote sensing, hydro-optical in homogeneities, target location.

Ссылка для цитирования: Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 41—48.

For citation: Glukhov V. A., Goldin Yu. A., Rodionov M. A. Experimental estimation of the capabilities of the lidar PLD-1 for the registration of various hydro-optical irregularities of the sea water column. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 2, 41—48.

DOI: 10.7868/S207366731702006X.

Эффективность применения радиометрических лидаров для дистанционной регистрации пространственной структуры гидрооптических полей в толще морской воды, обнаружения и определения характеристик светорассеивающих слоев, рыбных косяков, разного рода неоднородностей и погруженных объектов продемонстрирована в целом ряде натурных экспериментов [1—8]. Новый поляризационный лидар на базе гранатового лазера с диодной накачкой ПЛД-1 разработан с учетом современного уровня лазерной техники и элементной базы. Он предназначен для зондирования толщи морской воды. Разработка выполнена совместно сотрудниками Лаборатории оптики океана и атмосферы Санкт-Петербургского филиала Института океанологии и Лаборатории оптики океана Института океанологии РАН (Москва). Основной особенностью лидара ПЛД-1 является использование лазера с диодной накачкой. Это обеспечивает значительно больший по сравнению с ламповой накачкой ресурс работы, малогабаритность конструкции, высокую стабильность метрологических характеристик и более низкий уровень электрических наводок. Последнее обстоятельство позволяет существенно повысить чувствительность лидара к неоднородностям в толще морской воды.

Измерения, выполняемые с использованием лидара ПЛД-1, позволяют:

- проводить исследования возможности обнаружения и регистрации положения расположенных в толще воды объектов в зависимости от первичных гидрооптических характеристик (ПГХ), состояния взволнованной поверхности воды, параметров объекта и геометрических факторов;
- проводить зондирование стратифицированной толщи морской воды с целью определения параметров стратификации ПГХ;
- обнаруживать и определять параметры светорассеивающих слоев;
- регистрировать внутренние волны и определять их характеристики;
- оценивать значения ПГХ однородных участков водной толщи.

Первые натурные исследования с лидаром ПЛД-1 были проведены в прибрежных водах Черного моря, характеризующихся низкой прозрачностью. Исследования проводились при размещении лидара на пирсе. В статье представлены некоторые результаты этих исследований.

Морской поляризационный лидар ПЛД-1. Лидар состоит из оптического блока, блока питания лазера, блоков управления и регистрации и устройства крепления и наведения оптического блока. Оптический блок содержит лазерный излучатель, двухканальную фотоприемную систему, и двухканальный источник высоковольтного питания. В качестве источника зондирующего излучения использован импульсный твердотельный лазер на АИГ:Nd³⁺ с накачкой активного элемента решётками лазерных диодов и преобразованием частоты излучения во вторую гармонику (разработка ООО «ЛАГРАН» г. Москва).

Для приёма эхо-сигналов в режиме зондирования толщи морской воды используется фотоприёмное устройство (ФПУ). Оно включает в себя два идентичных по конструкции фотоприёмника, предназначенных для регистрации двух компонент эхо-сигнала с взаимно ортогональными поляризациями (ко- и кросс-поляризованные компоненты). В качестве первичных фотоэлектронных преобразователей в ФПУ использованы специально отобранные фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-115М с малым последствием. Непосредственно на входе каждого фотоприёмника установлен интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны $\lambda = 532$ нм и шириной полосы пропускания 10 нм, отсекающий фоновое световое излучение. Угол раскрытия диаграмм обоих каналов равен 2°.

В качестве приёмной оптической системы канала, принимающего ко-поляризованную компоненту эхо-сигнала, использован зеркальный объектив типа MC-3M-5CA. В канале, принимающем кросс-поляризованную компоненту эхо-сигнала, используется зеркальный объектив типа SAMYANG mirror-500mm 1:63 DX. Поляризационная селекция в каждом из каналов осуществляется с помощью соответствующим образом ориентированных плёночных поляризаторов, установленных на входе приёмных оптических систем. Сигнал с приёмников поступает на четырехканальный широкополосный цифровой осциллограф Tektronix TDS 2024, а с него передается на компьютер.

Для считывания с осциллографа, визуализации и дальнейшей обработки регистрируемых сигналов на компьютере был написан комплекс программ в среде LabView. Этот комплекс позволяет записывать сигнал с осциллографа в текстовый файл с частотой дискретизации — 2.5 Гвыб/с, частотой следования эхо-сигнала до 1 Гц и динамическим диапазоном 8 бит. Для каждого эхо-сигнала формируется отдельный текстовый файл с точным указанием времени регистрации.

При проведении исследований для установки оптического блока использовано специально разработанное устройство крепления и наведения (УКН). УКН обеспечивает изменение вертикального ($10\text{—}70^\circ$) и азимутального (в пределах $\pm 20^\circ$) углов. Управление УКН осуществляется дистанционно. Данные с потенциометрических датчиков углов регистрируются компьютером.

Лидар ПЛД-1 имеет следующие основные технические характеристики: длина волны зондирующего излучения 532 нм, энергия зондирующего импульса 20—40 мДж, длительность зондирующего импульса по уровню 0.5—7 нс, расходимость по уровню 80 % энергии 3 мрад, поляризация зондирующего излучения линейная, частота зондирования (регулируется) 0.5—20 Гц, световой диаметр приемной оптической системы первого канала 63 мм, световой диаметр приемной оптической системы второго канала 90 мм, угол поля зрения оптических систем первого и второго каналов 2 градуса, аналоговая полоса пропускания регистрирующей системы 350 МГц, время нарастания сигнала регистрирующей системы при нагрузке 50 Ом — 1 нс, разрешение АЦП по вертикали 8 бит, частота дискретизации АЦП 2.5 ГГц.

Вид оптического блока лидара показан на рис. 1.

Измерение импульсной характеристики лидара. Импульсная характеристика лидара определяет пространственное разрешение лидарных измерений по дальности и точность определения дальности до регистрируемых объектов. Она представляет собой свертку зондирующего лазерного импульса с импульсной характеристикой приемно-регистрирующей системы. Параметры импульсной характеристики можно определить путем зондирования на относительно короткой воздушной трассе практически не вносящей затягивания зондирующего и отраженного световых импульсов, плоского щита, расположенного ортогонально к оси зондирующего пучка. Форма зарегистрированного в этом случае эхо-сигнала будет близка к форме импульсной характеристики.

Соответствующие измерения были выполнены на воздушной трассе протяженностью 20 м в отсутствии тумана, дыма, атмосферных осадков и прочих помех.

На рис. 2 представлена форма кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала, зарегистрированная при напряжении питания ФЭУ 2.0 кВ. Статистическая обработка 30 зарегистрированных эхо-сигналов

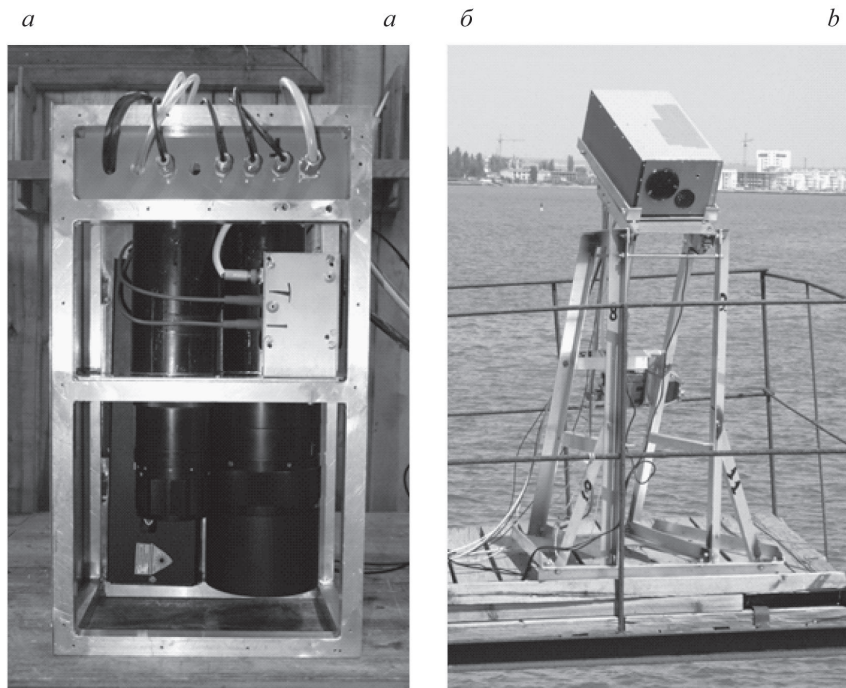


Рис. 1. Вид лидара ПЛД-1.
a — оптический блок лидара ПЛД-1; *б* — оптический блок лидара, укрепленный на устройстве наведения.

Fig. 1. The view of lidar PLD-1.
a — optical unit of the lidar PLD-1; *b* — optical unit of the lidar mounted on the leveling device.

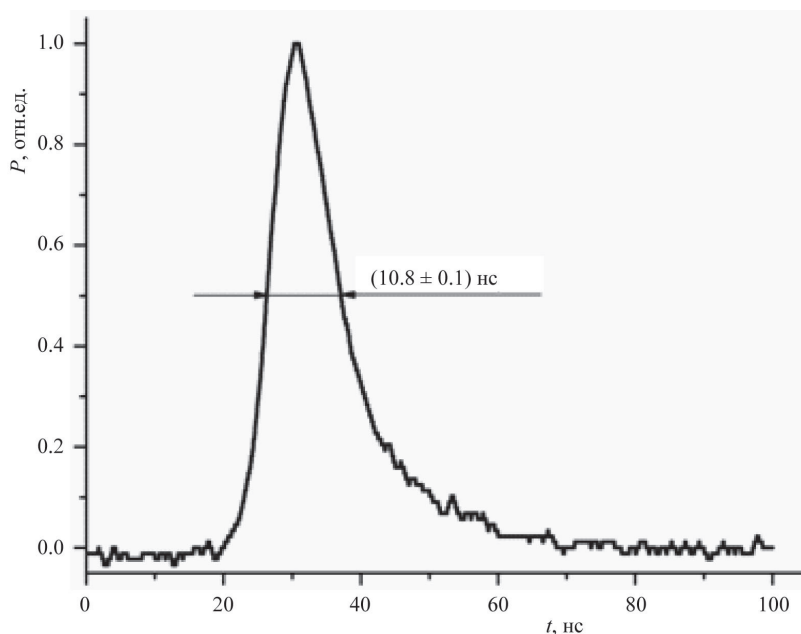


Рис. 2. Форма импульсной характеристики лидара.

Fig. 2. Lidar pulse function.

показала, что средняя длительность на уровне 0.5 от высоты составляет (10.8 ± 0.1) нс. Аналогичный результат был получен для ко-поляризованной компоненты эхо-сигнала.

Таким образом, по данным измерений длительность импульсной функции каждого из двух измерительных каналов по полувысоте равна (10.8 ± 0.1) нс.

Лидарное зондирования погруженных объектов. Осенью 2015 г. и весной 2016 г. на акватории Черного моря (г. Феодосия) были проведены испытания лидара для определения работоспособности различных блоков лидара в морских условиях и получение материала для дальнейшей разработки и усовершенствования прибора. При этом выполнялось зондирование толщи морской воды, дна и различных погруженных объектов.

Геометрическая схема зондирования, выполнявшегося с пирса, показана на рис. 3. Здесь H — высота лидара над поверхностью воды; α — вертикальный угол наклона оси зондирующего пучка относительно вертикали; φ — азимутальный угол направления пучка; Z — глубина дна.

В качестве тестовых измерений были выполнены локация дна при разных углах зондирования, а также локация плоского щита и сферической мишени, погруженных на разные глубины. Для каждого случая выполнены длительные циклы регистрации эхо-сигнала, что позволило провести статистическую обработку результатов зондирования. Ниже представлен ряд примеров результатов тестовых измерений.

Серия кросс-поляризованных компонент эхо-сигналов, зарегистрированных при локации сферической мишени, показана на рис. 4. Диаметр мишени 0.4 м. Глубина погружения 3 м при общей глубине 7 м. Угол зондирования 61° от вертикали. Наклонное расстояние от лидара до мишени 20.3 м. При этом протяженность воздушного участка трассы 16.3 м, подводного 4 м. Относительная прозрачность воды $Z_0 = 7.5$ м. Поверхностное волнение менее 1 балла.

Представленная на рисунке серия показывает изменение величины отраженного от мишени сигнала при изменении азимутального угла зондирования в пределах 0.57° ($34'$). Эхо-сигнал № 1 соответствует попаданию зондирующего лазерного пучка в центр мишени, эхо-сигнал № 6 — ситуации, когда пучок на мишень не попадает. Все эхо-сигналы от толщи воды нормированы к единице.

Пример регистрации объекта, расположенного вблизи дна, показан на рис. 5 — ко-поляризованная компонента эхо-сигнала, зарегистрированная при локации плоской мишени. Плоскость ориентирована вертикально. Глубина погружения мишени 3.7 м при общей глубине 6 м. Угол зондирования 35°

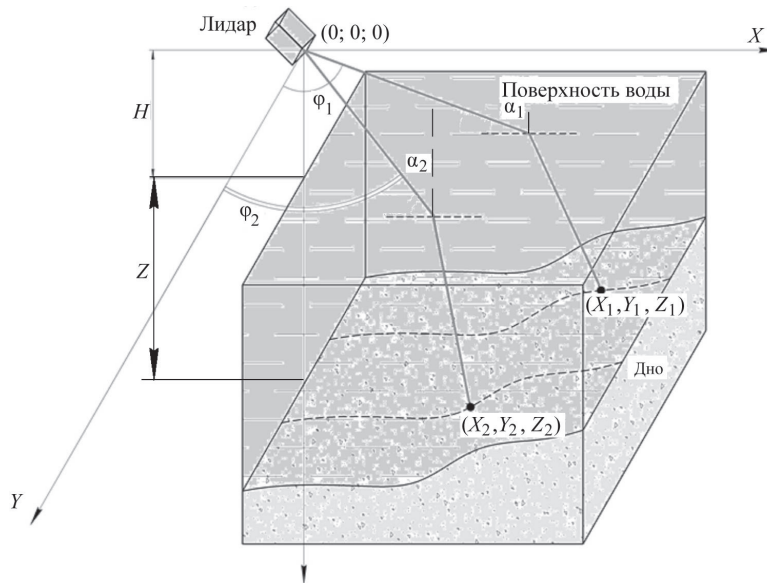


Рис. 3. Схема лидарного зондирования.

Fig. 3. Lidar Sounding Scheme.

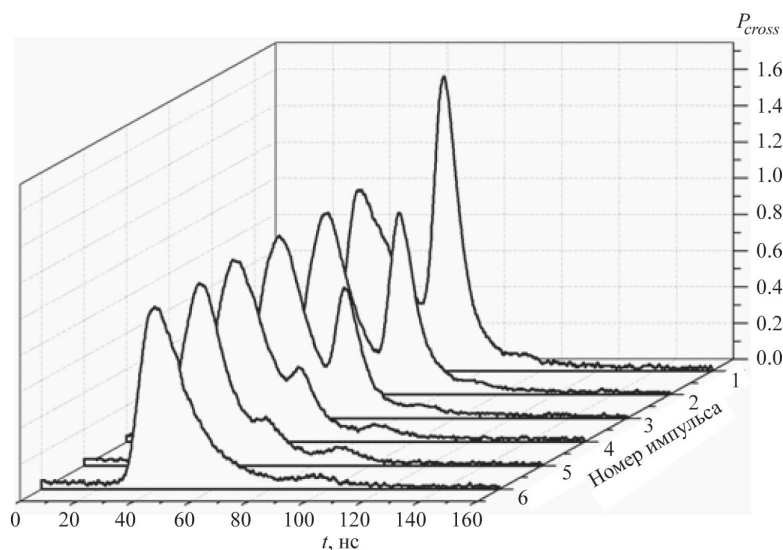


Рис. 4. Серия кросс-поляризованных компонент эхо-сигналов, зарегистрированных при локации сферической мишени.

Fig. 4. A series of cross-polarized echo-signals recorded during the location of a spherical target.

от вертикали. Наклонное расстояние от лидара до мишени 13.4 м. При этом протяженность воздушного участка трассы 9.3 м, подводного 4.1 м. Относительная прозрачность воды $Z_0 = 7,5$ м. Поверхностное волнение менее 1 балла. Вершина эхо-сигнала от толщи воды отрезана.

Лазерный пучок попадает в край мишени и перекрывается ею только частично. Это позволило получить сигналы от мишени и от дна одновременно. Указанные сигналы четко разделены, что дает возможность определить по данным лидарного зондирования глубину погружения мишени и глубину дна.

Сопоставление ко- и кросс-поляризованных компонент, зарегистрированных при локации сферической мишени, глубина погружения которой меняется от 1.5 до 4 м, представлено в серии эхо-сигналов на рис. 6.

Измерения выполнены в мутных водах, характеризующихся величиной относительной прозрачности $Z_0 = 4$ м.

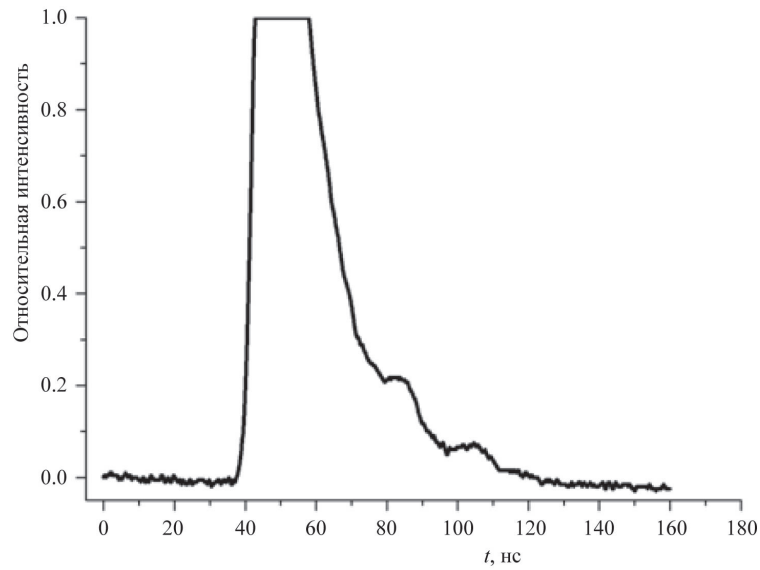


Рис. 5. Ко-поляризованная компонента эхо-сигнала от плоской мишени, расположенной вблизи дна.

Fig. 5. The co-polarized echo-signal of a flat target located near the bottom.

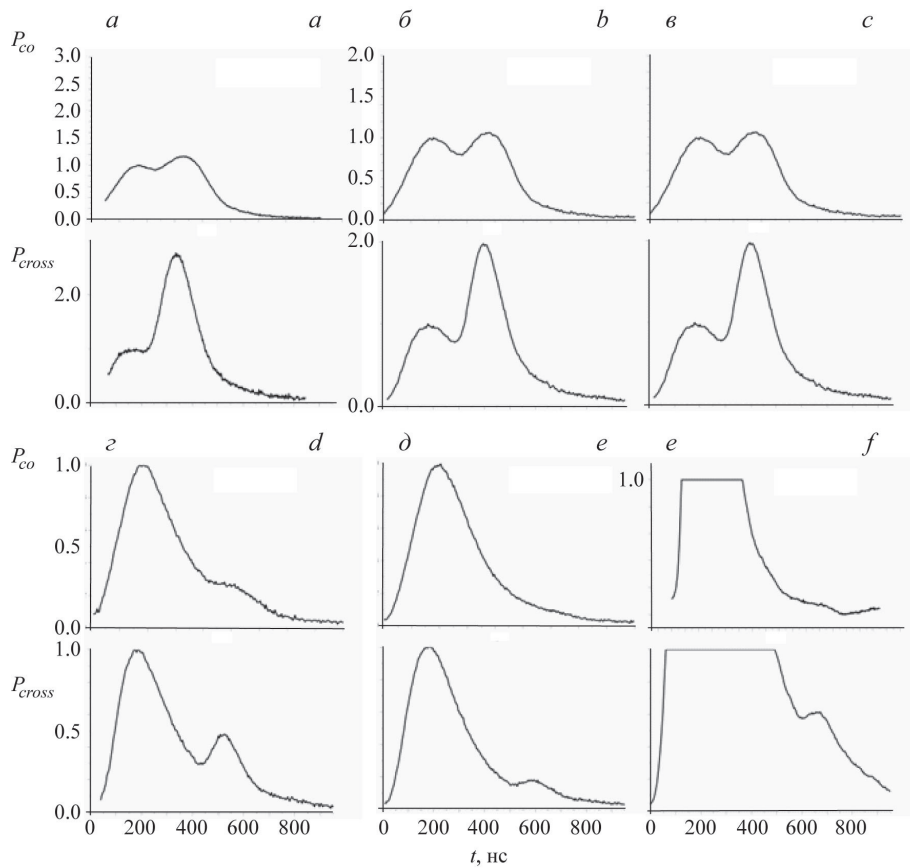


Рис. 6. Ко- и кросс-поляризованные компоненты эхо-сигналов, зарегистрированные при локации сферической мишени, глубина погружения которой меняется от 1.5 до 4 м.

$a - z = 1.5$ м; $б, в - z = 2$ м; $г - z = 3$ м; $д - z = 3.5$ м; $е - z = 4$ м.

Fig. 6. Co- and cross-polarized echo-signals of the spherical target, the depth of immersion of which varies from 1.5 to 4 meters.

$a - z = 1.5$ м; $b, c - z = 2$ м; $d - z = 3$ м; $e - z = 3.5$ м; $f - z = 4$ м.

При глубине погружения сферической мишени $Z_M = 1.5$ м общая длина трассы зондирования $L = 16.8$ м, подводного участка трассы $L_B = 1.9$ м; при $Z_M = 2$ м $L = 17.4$ м и $L_B = 2.6$ м; при $Z_M = 2.5$ м $L = 18.8$ м и $L_B = 3.3$ м; при $Z_M = 3$ м $L = 19.3$ м и $L_B = 3.9$ м; при $Z_M = 3.5$ м $L = 19.4$ м и $L_B = 4.6$ м; при $Z_M = 4$ м $L = 20.1$ м и $L_B = 5.2$ м, соответственно.

Как следует из рис. 6, локация мишени с регистрацией кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала при всех глубинах погружения мишени имеет преимущество по сравнению с регистрацией ко-поляризованной компоненты.

Отраженный от мишени сигнал $P_{\text{сиг}}(t)$ регистрируется на фоне эхо-сигнала $P_B(t)$, сформированного в результате рассеяния и поглощения света в толще воды. Возможности регистрации $P_{\text{сиг}}(t)$ в значительной мере определяются соотношением уровней сигналов $P_{\text{сиг}}(t)$ и $P_B(t)$. Начальный участок сигнала $P_B(t)$, сформированный близлежащими к лидару слоями воды, имеет большую амплитуду, перегружает входные блоки регистрирующей системы и ограничивает возможность увеличения чувствительности приемной системы при регистрации удаленных объектов.

Отношения пиковых значений амплитуд $P_{\text{сиг}}(t)$ и $P_B(t)$ в зависимости от дальности до мишени для ко- и кросс-поляризованных компонент эхо-сигналов по данным серии измерений, представленных на рис. 6, показано на рис. 7. Дальность до мишени соответствует протяженности подводного участка трассы зондирования.

Как следует из представленных на рис. 7 данных отношение пиковых значений амплитуд сигналов от мишени и от воды при всех дальностях до мишени существенно выше (в ~ 2.3 раза) для случая кросс-поляризованных компонент эхо-сигналов.

Участок спада эхо-сигнала от воды во временном интервале, соответствующем моменту прихода сигнала от мишени, для сигнала от мишени является фоном. Отношение амплитуды $P_{\text{сиг}}(t)$ и уровня фона определяет возможность выделения и регистрации сигнала от мишени. Кроме того, от уровня фона в основном зависит уровень шумов, определяющих предельную дальность локации мишени.

Зависимость отношения пиковой амплитуды $P_{\text{сиг}}(t)$ к амплитуде соответствующего участка спада $P_B(t)$ (к уровню фона) от дальности до мишени для ко- и кросс поляризованных компонент эхо-сигнала показана на рис. 8. Как следует из приведенных на рисунке зависимостей, при всех исследованных дальностях до мишени регистрация кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала дает существенное преимущество по сравнению с регистрацией ко-поляризованной компоненты.

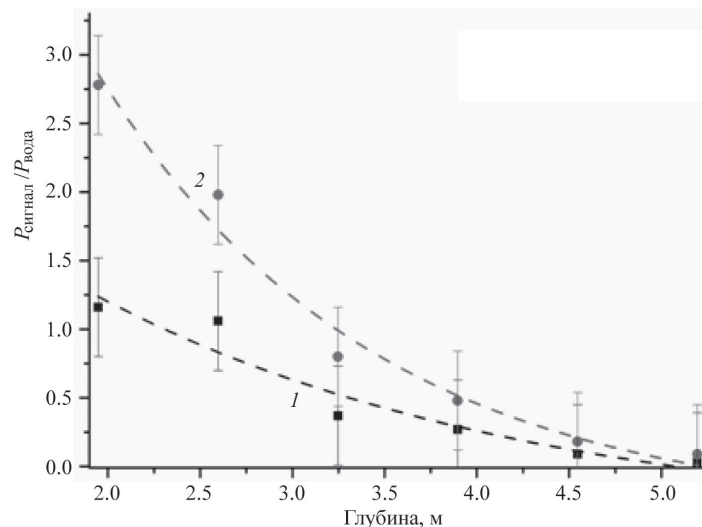


Рис. 7. Отношения пиковых значений эхо-сигналов от мишени и от толщи воды в зависимости от дальности до мишени. Ко- (1) и кросс-поляризация (2).

Fig. 7. The ratios of the peak values of the echo-signal of the target and of the water column as a function of the range to the target. Co- (1) and cross-polarized (2).

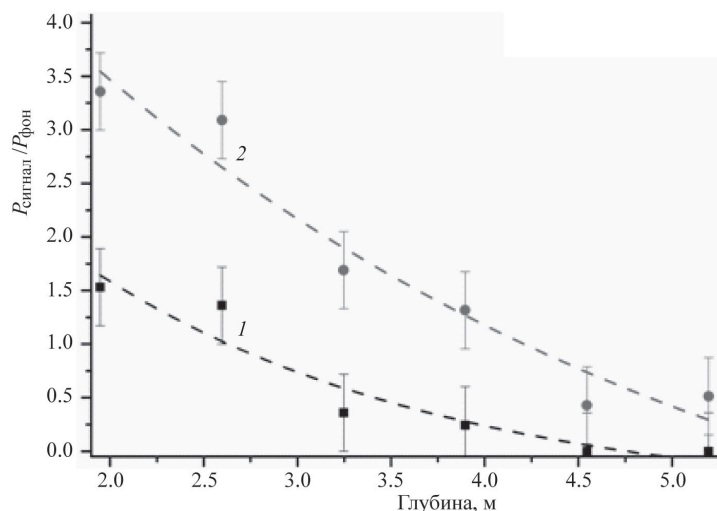


Рис. 8. Зависимость отношения пиковых значений эхо-сигналов от мишени и уровня фона от дальности до мишени. Ко- (1) и кросс-поляризация (2).

Fig. 8. The ratio of the peak values of the echo-signals of the target and of the background as a function of the range to the target. Co- (1) and cross-polarized (2).

Морской поляризационный лидар ПЛД-1, использующий в качестве источника зондирующего излучения твердотельный импульсный лазер на АИГ:Nd с диодной накачкой, предназначен для решения задач, связанных с определением пространственной структуры полей гидрооптических характеристик, а также регистрации и определения положения объектов в толще морской воды. Проведена оценка возможностей макета лидара по поиску различных объектов, находящихся в толще морской воды. Уверенно зарегистрированы эхо-сигналы от плоской и сферической мишеней при протяженности подводного участка трассы зондирования более чем в двое превышающим глубину видимости белого диска Зб. Продемонстрированы возможности макета лидара по обнаружению подводных объектов в толще морской воды через взволнованную поверхность. Продемонстрировано преимущество поляризационного метода локации погруженных объектов с регистрацией кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала. Получены данные, позволяющие сделать оценки разрешающей способности и точности определения положения при регистрации погруженных объектов вблизи поверхности и дна.

Литература

1. *Vasilkov A. P., Goldin Yu. A., Gureev B. A., Hoge F. E., Swift R. N., Wright C. W.* Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. P. 4353—4364.
2. *Гольдин Ю. А., Лучинин А. Г.* Авиационные лидарные методы исследования вертикальной структуры оптических характеристик верхнего слоя океана // *Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование.* Н. Новгород, ИПФ РАН, 1999. С. 345—381.
3. *Churnside J. H., Ostrovsky L. A.* Lidar observation of a strongly nonlinear internal wave in the gulf of Alaska // *Intern. Journal of Remote Sensing.* 2005. V. 26, № 1. P. 167—177.
4. *Churnside J. H., Donaghay P. L.* Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science.* 2009. V. 66. P. 778—789.
5. *Goldin Y. A., Vasilev A. N., Lisovskiy A. S., Chernook V. I.* Results of Barents Sea airborne lidar survey // *Proc. SPIE.* Vol. 6615. 66150E (Apr.13, 2007).
6. *Churnside J. H., Brown E. D., Parker-Stetter S., Horne J. K., Hunt G. L., Hillgruber N., Sigler M. F., Vollenweider J. J.* Airborne remote sensing of biological hot spot in the Southeastern Bering Sea // *Remote Sensing.* 2011. V. 3. P. 621—637.
7. AN/AES-1 Airborne Laser Mine Detection System (ALMDS) URL: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/an-aes-1.htm> (Дата обращения: 25.02.2017).
8. CZMIL Airborne Bathymetric Lidar Summary Specification Sheet URL: <https://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/CZMIL-Nova-Specsheet-150626-WEB.pdf> (Дата обращения: 25.02.2017).