



СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

<i>Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г.</i> Безотражательное распространение волн в сильно неоднородных средах	4
<i>Чаликов Д.В.</i> Трансформация гармонических волн на глубокой воде	14
<i>Волков К.Н., Емельянов В.Н., Курова И.В.</i> Моделирование крупных вихрей в задачах гидрофизики и гидроакустики	22
<i>Карлин Л.Н., Рябченко В.А., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А.</i> Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря	39
<i>Никифоров С.Л., Попов В.А., Попов О.Е., Селезнев И.А.</i> Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования	49
<i>Долин Л.С.</i> Лидарный метод измерения частотно-контрастной характеристики водных слоев	62
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С.</i> Методы апертурного синтеза гидроакустических антенн в пассивном режиме и их испытание на тестовых и реальных сигналах	72

Конференции

XXII семинар «Струйные, отрывные и нестационарные течения» (<i>Матвеев С.К., Усков В.Н.</i>)	86
--	----

Из истории науки

Г.И. Марчук о физике атмосферы и океана	87
---	----

Поздравляем!	91
---------------------------	----

Хроника	94
----------------------	----

Правила представления материалов в редакцию.....	97
--	----

CONTENTS

Articles

<i>Pelinovsky E.N., Talipova T.G. Non-reflective Wave Propagation in Strongly Inhomogeneous Media</i>	4
---	---

It is well known that wave dispersion in inhomogeneous media leads to energy flux weakening on large distances. The more interesting cases are when inhomogeneity does not prevent wave propagation. This problem is studied here for internal waves in the ocean. Firstly, the penetration of internal waves into a deep ocean, stratified with density and current, is discussed, and it is shown that there is sufficient number of stratification profiles allowing non-reflected wave propagation into the ocean bulk. Further the internal wave propagation in two-layer stratified ocean of variable depth is investigated. The set of bottom profiles where the wave energy is not scattered, is also found.

Key words: non-reflected wave propagation, internal waves, non-reflected stratification and bottom profile.

<i>Chalikov D.V. Harmonic Wave Deep Water Transformation</i>	14
--	----

Precise numerical model of potential; surface waves is used to investigate the wave field evolution, initially assigned as a train of harmonic waves. It is shown that harmonic wave of any amplitude quickly generates the new modes, which undergo the complicated evolution. These modes can be referred neither to bound waves nor to free waves.

Key words: harmonic waves, instability, numerical modelling, Stokes waves.

<i>Volkov K., Emelyanov V., Kurova I. Large-eddy Simulation in Hydrophysical and Hydroacoustic Problems</i>	22
---	----

Applications of large-eddy simulation (LES) technique to the solution of problems of hydrophysics and hydroacoustics are considered. Solutions of some model problems (free mixing layer, free sub-sonic non-isothermal turbulent jet flowing out of circular nozzle into submerged space, and aero-optical effects in turbulent flows) are presented. The results obtained are compared to the data calculated with the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations and equations of the k – ϵ turbulence model, as well as to the available experimental data. The conclusions related to the perspectives of use of this technique in the problems of hydrophysics and hydroacoustics are made.

Key words: turbulence, large-eddy simulation, computational fluid dynamics, jet, mixing layer.

<i>Karlin L.N., Ryabchenko V.A., Vankevich R.E., Eremina T.R., Isaev A.V., Neelov I.A.</i> Testing an Operational Oceanographic System Testing by Means of Forecasting of Hydrodynamical Characteristics in the Gulf of Finland of the Baltic Sea	39
--	----

An operational system for forecasting of hydrodynamic characteristics in the Gulf of Finland GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System) has been developed. The system is based on the hydrodynamic module of St. Petersburg Baltic Eutrophication Model. The system has been working in the operation mode from May 2009 using data from short-term weather forecasts for the North-West Region of Russia and forecasts of boundary conditions at the entrance in the Gulf of Finland. 48-hour model forecasts were compared to observed vertical temperature and salinity profiles and water level in Kronshtadt. The comparison showed that the model system simulates the observations quite well.

Key words: operational oceanography, hydrodynamic forecast, the Gulf of Finland.

<i>Nikiforov S.L., Popov V.A., Popov O.E., Seleznev I.A.</i> The Concept of Common Sea-Bottom Geoacoustic Database Creation and Geoacoustic Modeling Techniques	49
---	----

The authors consider some problems of supporting Russia sea activity in the important water areas of the World ocean, which cause creation of geoacoustic databases and the geoacoustic models of a sea-bottom required for all carriers of sonar means of underwater conditions imaging for operative forecasting of surveillance conditions in the navigation area and supporting efficient operation of adaptive hydroacoustic information processing algorithms. The concept of common water areas sea-bottom database creation and sea bottom geoacoustic modeling techniques are offered. Data about structure of a perspective integrated sonar system of sea-bottom monitoring and problems solved with its help are cited.

Key words: geoacoustic model, database, sonar means, acoustic characteristics, offshore area.

<i>Dolin L.S.</i> Lidar Methods for Measurement of Modulation Transfer Function of Water Layers	62
--	----

We develop algorithms for retrieval of the water layer modulation transfer function (MTF) from the radiance of backscattered laser pulse. A lidar diagram is developed for remote measuring of the MTF. The water optical properties are then retrieved from measured MTF. We also propose a laser imaging system for sea bottom observation which corrects image distortion caused by light scattering in the water.

Key words: lidar, imaging, water, modulation transfer function, image correction.

<i>Dashevskii O.Yu., Nejevenko E.S.</i> Passive Aperture Synthesis Techniques for Towed Arrays and Their Probation with Test and Real Signals	72
--	----

The paper contains a brief review of aperture synthesis techniques for towed arrays operating in passive mode. A technique is suggested that is able to process wideband signals, also from multiple sources (as opposed to known techniques). The results of experimental studies of aperture synthesis are presented, obtained both from computer-generated signals (SynApp program has been developed for this purpose), and from signals of a real underwater towed array.

Key words: hydroacoustics, aperture synthesis, beamforming, modeling.

УДК 551.465

© Л.С. Долин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Lev.dolin@hydro.appl.sci-nnov.ru

ЛИДАРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНЫХ СЛОЕВ

Приводится алгоритм определения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) водных слоев по яркости рассеянного водой лазерного импульса. Предлагаются схемы лидаров для дистанционного измерения ЧКХ и алгоритмы определения оптических характеристик воды по измеренной ЧКХ. Обсуждаются принципы построения лазерной системы наблюдения морского дна, которая контролирует влияние водной среды на формируемое ею изображение и обеспечивает возможность коррекции искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде.

Ключевые слова: лидар, видение, вода, частотно-контрастная характеристика, коррекция изображений.

Океанологические лидары применяются для дистанционного измерения оптических характеристик морской воды, регистрации слоев мутности и внутренних волн в океане, диагностики растворенного и взвешенного в воде вещества, изучения ветрового волнения и биологических ресурсов океана (в частности, скоплений рыбы), а также для картографирования и профилирования мелководных участков морского дна с летательных аппаратов [1–16].

В статье предлагается и анализируется новый способ лидарного зондирования, который позволит осуществлять дистанционное измерение частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) водных слоев.

Эта характеристика необходима, прежде всего, для прогнозирования дальности действия систем подводного видения и коррекции искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде; наряду с этим она может служить полезным источником информации о рассеивающих свойствах воды.

Алгоритм определения ЧКХ по яркости рассеянного водой лазерного импульса

ЧКХ водного слоя – это коэффициент ослабления контраста изображения тест-объекта с синусоидальным распределением яркости, наблюдаемого через водный слой [17]. ЧКХ играет важнейшую роль в теории подводного видения, ее знание необходимо для построения моделей изображений, формируемых оптическими системами подводного наблюдения (в том числе, лазерными), оценки дальности действия этих систем и устранения искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде. До настоящего времени измерения ЧКХ проводились с помощью погружаемых в воду источников и приемников света.

Эти измерения основывались на регистрации функции размытия точки (ФРТ), изображения точечного изотропного источника света (ТИИ), или функции размытия пучка (ФРП), распределения облученности от точечного мононаправленного источника (ТМИ).

Если считать, что ТИИ располагается на глубине $z = z_0$ (рис. 1), и обозначить через $L^{\text{ТИИ}}(r, z_0)$ видимую яркость источника как функцию координат точки пересечения линии визирования с плоскостью $z = z_0$, то ЧКХ водного слоя толщины z_0 можно выразить через $L^{\text{ТИИ}}$ в виде:

$$T(k, z_0) = \int_0^\infty L^{\text{ТИИ}}(r, z_0) J_0(kr) r dr / \int_0^\infty L^{\text{ТИИ}}(r, z_0) r dr, \quad (1)$$

где k – пространственная частота; $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода с нулевым индексом; r – модуль вектора \mathbf{r} , характеризующего положение точки в плоскости $z = z_0$. Изображение источника считается аксиально-симметричным, а его угловой размер – малым.

Возможность представления ЧКХ через ФРП вытекает из теоремы оптической взаимности, которая устанавливает связь между ФРП и ФРТ. Обозначим через $E^{\text{ТМИ}}(r, z_0)$ распределение освещенности на нижней границе водного слоя толщины z_0 от точечного мононаправленного источника, помещенного на его верхней границе $z = 0$ (рис. 2). Согласно теореме оптической взаимности, если оба источника (ТМИ и ТИИ) имеют одинаковую мощность, это распределение выражается через видимую яркость ТИИ в виде:

$$E^{\text{ТМИ}}(r, z_0) = 4\pi L^{\text{ТИИ}}(r, z_0), \quad (2)$$

Поэтому функцию $L^{\text{ТИИ}}$ в формуле (1) можно заменить на $E^{\text{ТМИ}}$ и выразить ЧКХ через ФРП:

$$T(k, z_0) = \int_0^\infty E^{\text{ТМИ}}(r, z_0) J_0(kr) r dr / \int_0^\infty E^{\text{ТМИ}}(r, z_0) r dr.$$

Предлагаемый метод дистанционного измерения ЧКХ основывается на регистрации «мгновенных изображений» светового пятна, которое формируется обратнорассеянным светом при прохождении лазерного импульса через водную толщу (рис. 3). Структура этого пятна полностью определяется видом функции $T(k, z_0)$ по следующим причинам. В момент времени t после посылки зондирующего импульса с длительностью Δt эхосигнал приходит с глубины $z_t = vt/2$ из водного слоя толщиной $\Delta z_t = v\Delta t/2$, где v – скорость света в воде. Если пучок подсветки считать бесконечно узким, то пространственные распределения освещенности и яркости обратнорассеянного света на глубине z_t будут описываться функцией $E^{\text{ТМИ}}(r, z_t)$.

Поэтому яркость выходящего из воды света $L(r_0, z_t)$ как функцию точки пересечения линии визирования с плоскостью $z = z_t$ можно считать изображением плоского источника, истинная яркость которого воспроизводит ФРП. Видимая яркость этого источника отличается от его истинной яркости,

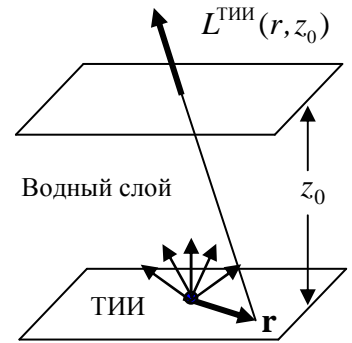


Рис. 1.

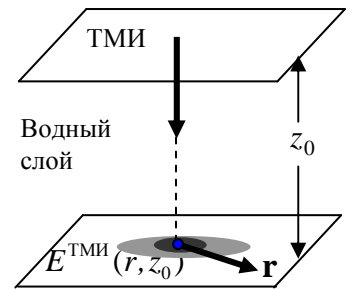


Рис. 2.

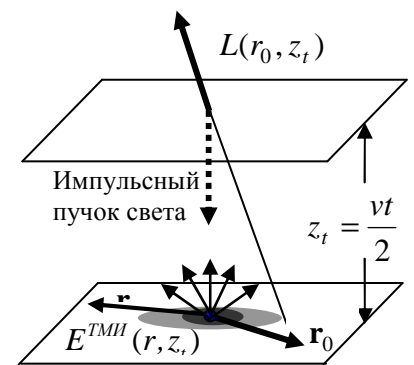


Рис. 3.

поскольку источник наблюдается через толщу рассеивающей среды. Однако согласно формуле (2) размытие изображения каждого из элементов указанного источника тоже описывается функцией $E^{\text{ТМИ}}(r, z_t)$, благодаря чему ее пространственный спектр, а следовательно, и ЧКХ, можно восстановить по измеренной зависимости $L(r_0, z_t)$.

Чтобы установить количественную связь между ЧКХ и функцией $L(r_0, z_t)$, представим индикатрису рассеяния воды в виде:

$$x(\gamma) = (1 - 2p_b)x_1(\gamma) + 2p_b,$$

где $p_b = \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} x(\gamma) \sin\gamma d\gamma$ – вероятность обратного рассеяния, а функция $x_1(\gamma)$ описывает

остронаправленную часть индикатрисы и удовлетворяет условиям $\frac{1}{2} \int_0^{\pi} x_1(\gamma) \sin\gamma d\gamma = 1$,

$\frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} x_1(\gamma) \sin\gamma d\gamma \ll p_b$. Тогда яркость выходящего из воды излучения можно выразить через ФРП в виде:

$$L(r_0, z_t) = (vW / 4\pi)b_b(z_t) \iint_{\infty} E^{\text{ТМИ}}(r, z_t) E^{\text{ТМИ}}(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|, z_t) d\mathbf{r}, \quad (3)$$

где W – энергия зондирующего импульса; $b_b = bp_b$ – показатель обратного рассеяния; b – полный показатель рассеяния; функция $E^{\text{ТМИ}}(r, z)$ описывает поле освещенности, которое создается непрерывным ТМИ с единичной мощностью во вспомогательной среде с индикатрисой рассеяния $x_1(\gamma)$, показателем рассеяния $b_1 = b - 2b_b$ и показателем поглощения $a_1 = a + 2b_b$.

Согласно формуле (3) пространственные спектры «мгновенного изображения» лазерного пятна и функции размытия пучка:

$$\tilde{L}(k, z_t) = \int_0^{\infty} L(r_0, z_t) J_0(kr_0) r_0 dr_0, \quad \tilde{E}^{\text{ТМИ}}(k, z_t) = \int_0^{\infty} E^{\text{ТМИ}}(r, z_t) J_0(kr) r dr$$

связаны соотношением $\tilde{L}(k, z_t) = 2\pi^2 v W b_b(z_t) (\tilde{E}^{\text{ТМИ}}(k, z_t))^2$, из которого следует, что ЧКХ водного слоя $T(k, z_t) = \tilde{E}^{\text{ТМИ}}(k, z_t) / \tilde{E}^{\text{ТМИ}}(0, z_t)$ выражается через пространственный спектр изображения лазерного пятна в виде:

$$T(k, z_t) = \sqrt{\tilde{L}(k, z_t) / \tilde{L}(0, z_t)}. \quad (4)$$

Функция размытия пучка определяется по ЧКХ с помощью выражения:

$$E^{\text{ТМИ}}(r, z_t) = \frac{P^{\text{ТМИ}}(z_t)}{2\pi} \int_0^{\infty} T(k, z_t) J_0(kr) k dk,$$

если известна мощность пучка на глубине z_t :

$$P^{\text{ТМИ}}(z_t) = 2\pi \int_0^{\infty} E^{\text{ТМИ}}(r, z_t) r dr.$$

Лидары для измерения ЧКХ

Лидары для измерения ЧКХ должны тем или иным способом формировать изображение светового пятна, которое создается лазерным пучком на нижней границе исследуемого слоя воды (рис. 4). Это изображение может быть получено различными способами:

- путем проецирования плоскости $z = z_t$ на многоэлементный (матричный) фотодетектор и одновременной регистрации сигналов, приходящих от различных элементов этой плоскости в момент времени t (рис. 4а);
- измерением мощности сигнала, поступающего на одноэлементный фотодетектор с глубины $z = z_t$, в зависимости от угла поля зрения приемника 2ϑ (рис. 4б);
- измерением мощности эхо-сигнала, поступающего на приемник с узкой диаграммой направленности, в зависимости от угла между оптическими осями излучателя и приемника ψ или от базы «излучатель-приемник» s (рис. 4в).

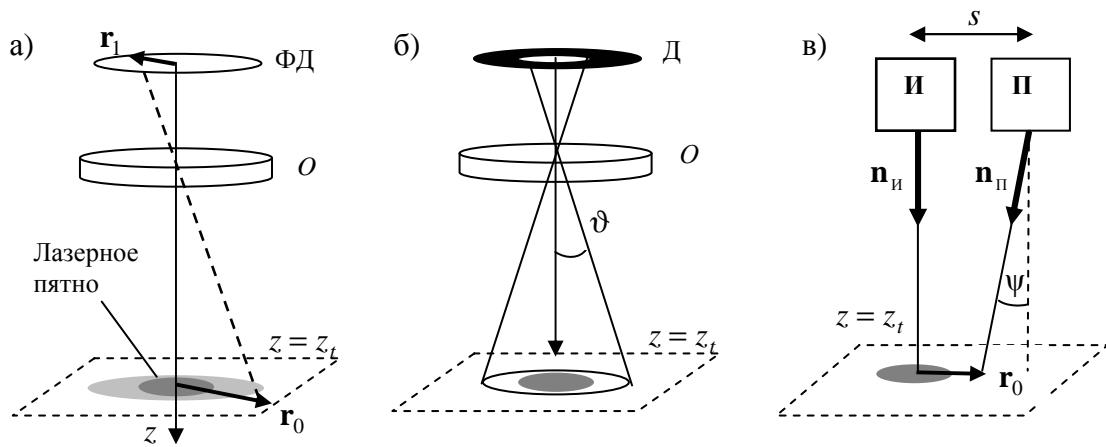


Рис. 4. Схемы лидаров для измерения ЧКХ: О – объектив, ФД – матричный фотодетектор, Д – диафрагма перед детектором, $\mathbf{n}_{\text{и,п}}$ – оптические оси излучателя (И) и приемника (П), s – база «излучатель-приемник».

Первым из указанных способов изображение формируется по одному импульсному отклику. Видимая яркость светового пятна $L(r_0, z_t)$ определяется из соотношений:

$$L(r_0, z_t) = \frac{f_o^2}{\Sigma_o} E_{\text{ФД}}(r_1, z_t), \quad r_1 = \frac{f_o}{z_t} r_0,$$

где $E_{\text{ФД}}(r_1, z_t)$ – освещенность точки фотодетектора \mathbf{r}_1 (см. рис. 4а) в момент времени t ; Σ_o и f_o – площадь входного зрачка и фокусное расстояние объектива.

Второй способ требует обработки серии импульсных откликов, зарегистрированных при различных значениях угла поля зрения приемника $2\vartheta = D / f_o$ (см. рис. 4б). Этот угол можно перестраивать путем изменения диаметра D освещаемого участка фотокатода. Если зависимость мощности принимаемого сигнала $P(\vartheta, t)$ от угла ϑ измерена, то распределение облученности на фотокатоде может быть восстановлено с помощью соотношения:

$$E_{\text{ФД}}(r_1, z_t) = \frac{1}{2\pi r_1} \left(\frac{\partial P}{\partial \vartheta} \right)_{\vartheta = r_1 / f_o} \cdot$$

Третий способ основывается на многократном зондировании водной толщи и сканировании плоскости $z = z_t$ узкой приемной диаграммой. Сканирование может осуществляться изменением угла отклонения оптической оси приемника от вертикали (ψ) или изменением расстояния (s) между излучателем и приемником (см. рис. 4в). При ориентации оптической оси приемника на точку \mathbf{r}_0 плоскости $z = z_t$ мощность принимаемого сигнала $P(r_0, z_t)$ пропорциональна видимой яркости этой точки. Поэтому в рассматриваемом случае ЧКХ водного слоя определяется по формуле (4) после замены функции $\tilde{L}(k, z_t)$ на функцию:

$$\tilde{P}(k, z_t) = \int_0^{\infty} P(r_0, z_t) J_0(kr_0) r_0 dr_0.$$

Измерение ЧКХ указанными способами возможно в интервале пространственных частот $k < k_{\max} \approx \pi \left(z_t \sqrt{\theta_{\text{И}}^2 + \theta_{\text{П}}^2} \right)^{-1}$, зависящем от ширины диаграмм направленности источника ($2\theta_{\text{И}}$) и приемника ($2\theta_{\text{П}}$).

Определение оптических характеристик воды по измеренной ЧКХ

Для определения гидрооптических характеристик по измеренной ЧКХ можно воспользоваться формулами [17]:

$$T(k, z) = \exp[\varphi(k, z)], \quad \varphi(k, z) = \int_0^z b_1(z - \zeta) [x_s(k\zeta) - 1] d\zeta, \quad x_s(p) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} x_1(\gamma) J_0(p\gamma) \gamma d\gamma, \quad (5)$$

согласно которым ЧКХ зависит только от показателя и индикатрисы рассеяния света в переднюю полусферу. В случае когда эти характеристики не меняются с глубиной z , угловой спектр индикатрисы можно представить через ЧКХ в двух различных формах:

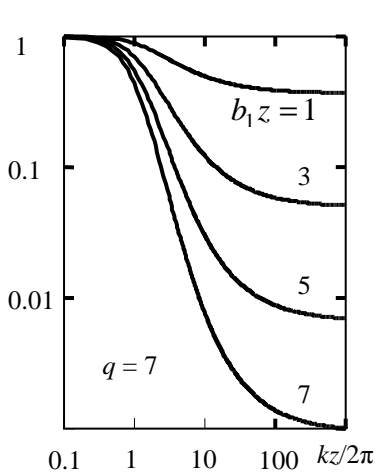


Рис. 5.

$$x_s(p) = 1 + \frac{1}{b_1} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]_{k=p/z}, \quad x_s(p) = 1 + \frac{1}{b_1 z} \left[\varphi + k \frac{\partial \varphi}{\partial k} \right]_{k=p/z}.$$

Использование первой из них требует данных о зависимости ЧКХ от глубины z , а вторая формула позволяет восстанавливать функцию $x_s(p)$ по ЧКХ водного слоя фиксированной толщины. На рис. 5 приведены ЧКХ водных слоев различной оптической толщины, рассчитанные по формулам (5) с использованием выражения $x_1(\gamma) = (2q/\gamma) \exp(-q\gamma)$. Из рисунка и формул (5) видно, что при $k > k^* \approx 100q/z$ ЧКХ перестает зависеть от k и описывается формулой $T \approx \exp(-b_1 z)$. Поэтому показатель рассеяния «вперед» может быть определен по измеренной ЧКХ с помощью соотношения $b_1 = -(\partial \varphi / \partial z)_{k=k^*}$.

Лазерная система видения, контролирующая собственную ЧКХ

Возможность определения поперечной структуры светового пучка на заданной глубине по зависимости рассеянного водой сигнала от угла (ψ) между оптическими осями излучателя и приемника (см. рис. 4в) может быть использована для создания лазерной системы наблюдения морского дна и подводных объектов, которая в процессе

работы будет контролировать собственную ЧКХ. Рассмотрим для примера лазерно-импульсную систему видения (СВ), которая располагается на движущейся платформе и формирует изображение дна путем синхронного сканирования оптических осей излучателя и приемника в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения СВ (левая часть рис. 6). Покажем, что если диаграммы направленности излучателя и приемника одинаковы, то ЧКХ такой системы в конкретных условиях наблюдения можно определить, прервав процесс сканирования одной из диаграмм и измерив мощность эхосигнала из придонного слоя воды в зависимости от угла ψ между направлениями зондирования и приема (правая часть рис. 6).

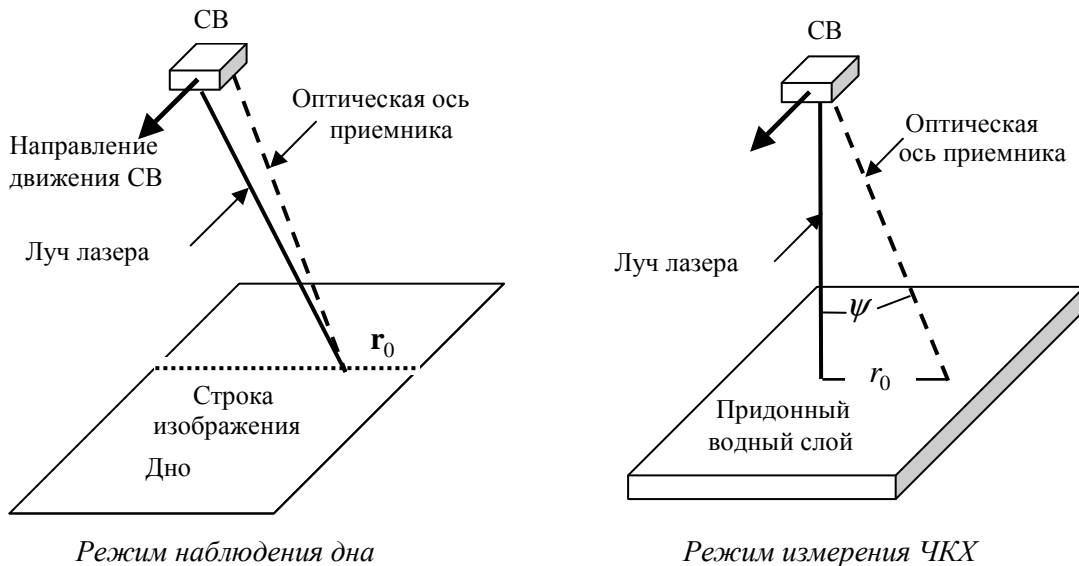


Рис. 6. Иллюстрация двух режимов работы однострочной буксируемой лазерно-импульсной системы видения.

ЧКХ системы подводного видения с узкими диаграммами направленности излучателя и приемника. Полагаем, что объект наблюдения (дно) располагается на глубине $z = z_0$ и представляет собой плоскую изотропно-рассеивающую поверхность с неоднородным коэффициентом диффузного отражения (альbedo) $R_{\text{об}}(\mathbf{r})$. Тогда мощность отраженного сигнала при ориентации оптических осей излучателя и приемника на точку объекта $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ определяется уравнением переноса изображения:

$$P_{\text{об}}(\mathbf{r}_0, z_0) = P_1(z_0) \iint_{\infty} R_{\text{об}}(\mathbf{r}) Q(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|, z_0) d\mathbf{r}, \quad (6)$$

где P_1 – мощность сигнала от поверхности $z = z_0$ с коэффициентом отражения $R_{\text{об}} = 1$; $Q(r_0, z_0)$ – функция размытия точки (ФРТ), которая характеризует структуру изображения бесконечно малого (точечного) объекта с координатами $\mathbf{r} = 0, z = z_0$ и удовлетворяет условию нормировки

$$\iint_{\infty} Q(r_0, z_0) d\mathbf{r} = 2\pi \int_0^{\infty} Q(r_0, z_0) r dr = 1$$

(формулы написаны для случая аксиально-симметричной ФРТ).

Пространственные спектры:

$$\tilde{R}_{\text{ОБ}}(\mathbf{k}) = (2\pi)^{-1} \iint_{\infty} R_{\text{ОБ}}(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

$$\tilde{P}_{\text{ОБ}}(\mathbf{k}, z_0) = (2\pi)^{-1} \iint_{\infty} P_{\text{ОБ}}(\mathbf{r}_0, z_0) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \quad (7)$$

функций $R_{\text{ОБ}}(\mathbf{r})$ и $P_{\text{ОБ}}(\mathbf{r}_0, z_0)$, характеризующих структуру «истинного» и видимого изображений объекта, связаны соотношением:

$$\tilde{P}_{\text{ОБ}}(\mathbf{k}, z_0) = P_1(z_0) T_{\text{СВ}}(k, z_0) \tilde{R}_{\text{ОБ}}(\mathbf{k}), \quad (8)$$

$$\text{где } T_{\text{СВ}}(k, z_0) = \iint_{\infty} Q(r_0, z_0) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 = 2\pi \int_0^{\infty} Q(r_0, z_0) J_0(kr_0) r_0 dr_0 \quad (9)$$

– ЧКХ системы видения в водной среде.

В отличие от ЧКХ водного слоя $T(k, z_0)$, которая описывает ослабление пространственных гармоник изображения самосветящегося объекта при его наблюдении через водный слой с помощью идеальной оптической системы, ЧКХ системы видения $T_{\text{СВ}}(k, z_0)$ несет информацию об ослаблении контраста изображения вариаций коэффициента отражения объекта, которое происходит под влиянием водной среды и вследствие ограниченной разрешающей способности самой системы формирования изображения.

В случае когда излучатель и приемник имеют одинаковые диаграммы направленности, ФРТ представляется в виде:

$$Q(r_0, z_0) = E^2(r_0, z_0) / \iint_{\infty} E^2(r_0, z_0) d\mathbf{r}_0 \quad (10)$$

через распределение облученности $E(r, z_0)$ в поперечном сечении вспомогательного стационарного пучка подсветки с единичной начальной мощностью на расстоянии z_0 от источника (вспомогательный пучок должен иметь такую же начальную расходимость и ширину, как реальный импульсный пучок подсветки). Функция P_1 в (6), (8) определяется по формуле:

$$P_1(z_0) = 2P_{\text{и}} \Sigma_{\text{О}} \Sigma_{\text{ФД}} f_0^{-2} \int_0^{\infty} E^2(r, z_0) r dr,$$

где $P_{\text{и}}$ – пиковая мощность источника; $\Sigma_{\text{О}}$ и f_0 – площадь входного зрачка и фокусное расстояние объектива; $\Sigma_{\text{ФД}}$ – площадь фотодетектора. Согласно (9), (10) ЧКХ рассматриваемой системы видения выражается в виде:

$$T_{\text{СВ}}(k, z_0) = \frac{\iint_{\infty} \tilde{E}(k', z_0) \tilde{E}(|\mathbf{k} - \mathbf{k}'|, z_0) d\mathbf{k}'}{\iint_{\infty} \tilde{E}^2(k', z_0) d\mathbf{k}'} \quad (11)$$

через пространственный спектр распределения облученности в поперечном сечении стационарного пучка подсветки:

$$\tilde{E}(k, z_0) = (2\pi)^{-1} \iint_{\infty} E(r_0, z_0) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 = \int_0^{\infty} E(r_0, z_0) J_0(kr_0) r_0 dr_0.$$

Поэтому задача контроля ЧКХ системы видения с одинаковыми диаграммами направленности излучателя и приемника сводится к определению распределения облученности в пучке подсветки на глубине расположения объекта.

Способ контроля ЧКХ. Структуру лазерного пятна на поверхности наблюдаемого объекта предлагается определять по рассеянному водой сигналу, который поступает на приемник в момент, предшествующий приходу отраженного от объекта импульса. Указанный сигнал приходит из водного слоя толщиной $\nu\Delta t/2$, прилегающего к поверхности объекта. При условии малости оптической толщины этого слоя ($b\nu\Delta t/2 \ll 1$) поперечная структура светового пучка внутри слоя и на поверхности объекта будет практически одинаковой. Поэтому горизонтальное распределение яркости отраженного слоем света не будет заметно отличаться от распределения облученности на поверхности объекта. Для измерения этого распределения необходимо зарегистрировать рассеянные водой сигналы со временем задержки $t \approx 2z_0/\nu$ при вертикальной ориентации лазерного пучка и различных направлениях приема (или при различных направлениях зондирования и вертикальной ориентации оптической оси приемника).

Мощность рассеянного водой сигнала, приходящего с глубины $z = z_0$:

$$P(r_0, z_0) = A \iint_{\infty} E(r, z_0) E(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|, z_0) d\mathbf{r}, \quad (12)$$

$$A = \frac{\nu W \Sigma_0 \Sigma_{\text{ФД}}}{4\pi f_0^2} b_b(z_0),$$

где r_0 – расстояние между точками пересечения плоскости $z = z_0$ оптическими осями излучателя и приемника (правая часть рис. 6); $E(r, z_0)$ – облученность плоскости $z = z_0$ как функция расстояния r до оси пучка подсветки, $\Sigma_{\text{ФД}}$ – площадь фотодетектора. Согласно (12) пространственный спектр распределения облученности в пучке подсветки выражается через $P(r_0, z_0)$ с помощью соотношений:

$$\tilde{E}(k, z_0) = \sqrt{\tilde{P}(k, z_0) / 2\pi A}, \quad (13)$$

$$\tilde{P}(k, z_0) = \int_0^{\infty} P(r_0, z_0) J_0(kr_0) r_0 dr_0. \quad (14)$$

При расчете $\tilde{E}(k, z_0)$ наряду с формулой (14) можно использовать выражение:

$$\tilde{P}(k, z_0) = z_0^2 \int_0^{\infty} P(\psi, z_0) J_0(kz_0\psi) \psi d\psi, \quad (15)$$

где $P(\psi, z_0)$ – мощность рассеянного водой сигнала как функция угла ψ между оптическими осями излучателя и приемника.

Таким образом, если зависимость $P(\psi, z_0)$ измерена, то в соответствии с (11), (13)–(15) ЧКХ системы видения определяется по формуле:

$$T_{CB}(k, z_0) = \frac{\iint_{\infty} \sqrt{\tilde{P}(k', z_0) \tilde{P}(|\mathbf{k} - \mathbf{k}'|, z_0)} d\mathbf{k}'}{\iint_{\infty} \tilde{P}(k, z_0) d\mathbf{k}}.$$

Знание ЧКХ системы видения обеспечивает возможность коррекции искажений изображения, возникающих в результате рассеяния света «вперед» при прямом и обрат-

ном прохождении лазерного импульса через водный слой $0 < z < z_0$. Для выполнения коррекции необходимо с помощью (7) найти пространственный спектр видимого изображения $\tilde{P}_{OB}(\mathbf{k}, z_0)$ и затем вычислить «истинное» (скорректированное) изображение по формуле:

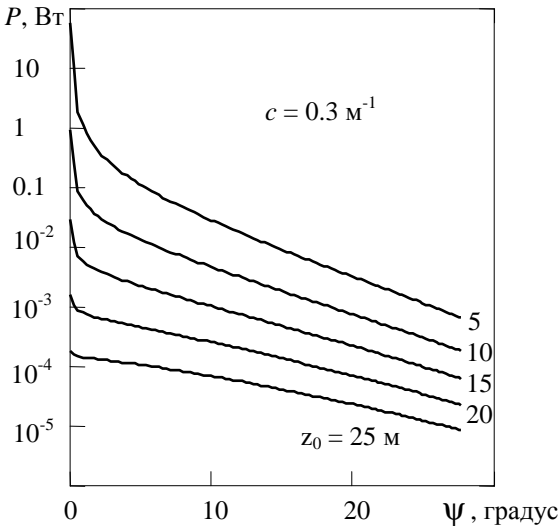


Рис. 7. Пример расчета мощности рассеянного водой сигнала в зависимости от угла Ψ .

Значения глубины (z_0) и показателя ослабления (c) указаны на рисунке.

$$I(\mathbf{r}_0, z_0) = (2\pi)^{-1} \iint_{\infty} \frac{\tilde{P}_{OB}(\mathbf{k}, z_0)}{T_{CB}(k, z_0)} \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}_0) d\mathbf{k}.$$

На рис. 7 приведены кривые, изображающие зависимость мощности рассеянного водой сигнала $P(\psi, z_0)$ от угла ψ между направлениями зондирования и приема для нескольких значений глубины z_0 , с которой приходит сигнал. Расчеты выполнены для системы с энергией лазерного импульса $W = 0.01$ Дж, диаметром объектива $D_o = 20$ см и шириной приемной диаграммы $2\vartheta = 0.05$ рад.

Согласно сделанной нами оценке, при длительности лазерного импульса 10 нс, чувствительности детектора 0.04 А/Вт и указанных выше значениях параметров W , D_o , 2ϑ ток полезного сигнала на выходе фотодетектора на порядок и более превышает среднеквадратичное значение дробового тока при мощно-

сти эхосигнала $P(\psi, z_0) > 1.6 \cdot 10^{-7}$ Вт. Сопоставление этой оценки с результатами расчетов, приведенных на рис. 7, указывает на то, что измерение зависимости P от ψ с целью оперативного контроля ЧКХ системы видения не требует принятия специальных мер по увеличению ее энергетического потенциала.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Существует принципиальная возможность дистанционного измерения ЧКХ водных слоев лидарным методом. Предлагаемый метод измерения ЧКХ основывается на анализе структуры изображения светового пятна, которое формируется обратнорассеянным светом в водной толще при прохождении через нее лазерного импульса. Двухмерный пространственный спектр этого изображения в момент времени t после посылки зондирующего импульса воспроизводит квадрат ЧКХ водного слоя толщиной $z_t = vt/2$ (v – скорость света в воде). Поэтому задача определения ЧКХ водного слоя заданной толщины решается путем регистрации видимой яркости нижней границы слоя в соответствующий момент времени.

2. Лидар для измерения ЧКХ может быть выполнен на основе многоэлементного детектора, одноэлементного фотоприемника с изменяющимся углом поля зрения или приемника с узкой сканируемой диаграммой направленности. Создание многоканального лидара в настоящее время представляется проблематичным ввиду отсутствия детекторов с требуемыми параметрами, а одноканальные лидары (с переменным углом поля зрения или узкой приемной диаграммой) могут быть реализованы на основе широко используемой элементной базы.

3. Существующая аналитическая модель ЧКХ водных слоев позволяет построить алгоритм определения передней части индикатрисы рассеяния и показателя рассеяния воды по измеренной ЧКХ.

4. Импульсную систему видения с «бегущим» лазерным лучом и узкой сканируемой диаграммой приемника можно приспособить для оперативного контроля собственной ЧКХ, что обеспечит возможность коррекции искажений изображения, обусловленных рассеянием света в воде.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-05-00252) и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 02.740.11.0566).

Литература

1. Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С., Моченев С.Б. Определение показателей поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света / Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах / Под ред. А.С.Мониной, К.С.Шифрина. М.: Наука, 1974. С.153–158.
2. Bunkin A.F., Vlasov D.V., Mirkaliev D.M., and Slabodyanin V.P. Laser sounding of turbidity profile and mapping of phytoplankton // Dokl. Akad. Nauk USSR. 1984. V.279. P.335–337.
3. Billard B., Abbot R.H., and Penny M.F. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELANDS laser airborne depth sounder // Appl. Opt. 1986. V.25. P.2080–2088.
4. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Савельев В.А., Фадеев В.В., Щегольков Ю.Б. Оптические методы диагностики океана. Лазерное дистанционное зондирование // Дистанционные методы изучения океана. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С.84–125.
5. Hoge F.E., Wright C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R., Gilbert G.D., Swift R.N., Yungel J.K., and Berry R.E. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // Appl. Opt. 1988. V.27. P.3969–3977.
6. Josph A. Shaw and James H. Churnside. Scanning-laser glint measurement of sea-surface slope statistics // Appl. Opt. 1997. V.36. No.18. P.4202–4212.
7. Vasilkov A.P., Goldin Y.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. No.24. P.4353–4364.
8. Bissonnette L.R., Roy G., Poutier L., Cober S.G., and Isaac G.A. Multiple-scattering lidar retrieval method: tests on Monte Carlo simulations and comparisons with *in situ* measurements // Appl. Opt. 2002. V.41. No.30. P.6307–6324.
9. Feygels V.I., Kopilevich Y.I., Surkov A., Yangel J.K., and Behrenfeld M.J. Airborne lidar system with variable field-of-view receiver for wateroptical measurements // Proc. SPIE Ocean Remote Sensing and Imaging II. 2003. V.5155, P.12–21.
10. James H. Churnside and James J. Wilson. Airborne lidar imaging of salmon // Appl. Opt. 2004. V.43. No.6. P.1416–1426.
11. Yuri Kopilevich; Viktor I.Feygels; Grady H. Tuell; Alexey Surkov. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): I. Theoretical background // Proc. SPIE. V.5885. 2005. 9 p.
12. Grady H. Tuell; Viktor Feygels; Yuri Kopilevich; Alan D. Weidemann; A. Grant Cunningham; Reza Mani; Vladimir Podoba; Vinod Ramnath; J.Y. Park; Jen Aitken. Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data // Proc. SPIE. V.5885. 2005. 13 p.
13. Hoge F.E. Oceanic inherent optical properties: proposed single laser lidar and retrieval theory // Appl. Opt. 2005. V.44. No.34. P.7483–7486.
14. James H. Churnside and Richard E. Thorne. Comparison of airborne lidar measurements with 420 kHz echosounder measurements of zooplankton // Appl. Opt. 2005. V.44. No.26. P.5504–5514.
15. Zege E., Katsev I., Prikhach A. Retrieval of Seawater Inherent Optical Properties Profiles from Lidar Waveforms // Proc. SPIE. 2007. V.6615. 66150B. 10 p.
16. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A., Savel'ev V.A. Inverse problems of lidar sensing of the ocean / Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters // Proceeding of SPIE. 2007. V.6615, 66150C. P.1–10.
17. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.

Статья поступила в редакцию 23.08.2010 г.

