

УДК 551.463.5

© А. А. Мольков^{1,2*}, 2022

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Пыжевский пер., д. 3, г. Москва, Россия

²Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, д. 46, г. Нижний Новгород, Россия

*E-mail: a.molkov@inbox.ru

КАЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ВОЛНЕНИЯ ПО МОДЕЛЬНЫМ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ КРУГА СНЕЛЛИУСА

Статья поступила в редакцию 02.09.2021, после доработки 15.12.2021, принята в печать 10.01.2022

Аннотация

На качественном уровне рассмотрены возможности использования оптических стереоизображений морской поверхности, зарегистрированных из-под воды, применительно к задаче дистанционной диагностики волнения. Задача реализована в численном эксперименте с использованием модели стереоизображения круга Снеллиуса (подводного изображения небосвода) для заданного рельефа морской поверхности. Проанализировано влияние параметров фотокамеры, геометрии наблюдения, освещения и волнения на качество построения карт диспаратности (смещения), необходимых для восстановления дальностей до визируемых элементов морской поверхности. Сформулированы рекомендации по методике проведения натурного эксперимента с целью апробации предложенного метода.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, подводное видение, стереовидение, диспаратность, изображение морской поверхности, круг Снеллиуса, ветровое волнение, уклоны поверхности

© А. А. Мольков^{1,2*}, 2022

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, 119017, Pyzhevsky Per., 3, Moscow, Russia

²Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, 603950, Ulyanov Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: a.molkov@inbox.ru

QUALITATIVE ESTIMATION OF MODELED SNELL'S WINDOW STEREO IMAGERY FOR WIND WAVE PROFILE RETRIEVAL

Received 02.09.2021, revised 15.12.2021, accepted 10.01.2022

Abstract

On a qualitative level, the possibilities of using optical stereo images of the sea surface, registered from under the water, are considered in relation to the problem of remote diagnostics of waves. The task is implemented in a numerical experiment using a stereo image model of the Snell's window (underwater image of the sky) for a given relief of the sea surface. The influence of the camera parameters, observation geometry, illumination and excitement on the quality of constructing disparity maps, necessary to restore the distances to the sighted elements of the sea surface, is analyzed. Recommendations on the methodology of a full-scale experiment in order to test the proposed method are formulated.

Keywords: remote sensing, underwater imagery, stereo imagery, disparity, Snell's window, sea roughness, wind waves

1. Введение

Регистрация и обработка изображений морской поверхности является одним из самых результативных инструментов для восстановления характеристик волнения в широком диапазоне длин поверхностных волн [1–3]. Среди существующих методов особое внимание заслуживает стереофотограмметрический метод, основанный на синхронной регистрации участка взволнованной водной поверхности с помощью двух (или более) фотокамер и последующей обработке стереоизображений с использованием известных алгоритмов восстановления дальности до элементов поверхности через величину диспаратности [4–7].

Ссылка для цитирования: Мольков А.А. Качественные оценки возможности восстановления профиля волнения по модельным стереоизображениям круга Снеллиуса // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 1. С. 33–47. doi: 10.48612/fpg/p112-6ptf-fh5r

For citation: Molkov A.A. Qualitative Estimation of Modeled Snell's Window Stereo Imagery for Wind Wave Profile Retrieval. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 1, 33–47. doi: 10.48612/fpg/p112-6ptf-fh5r

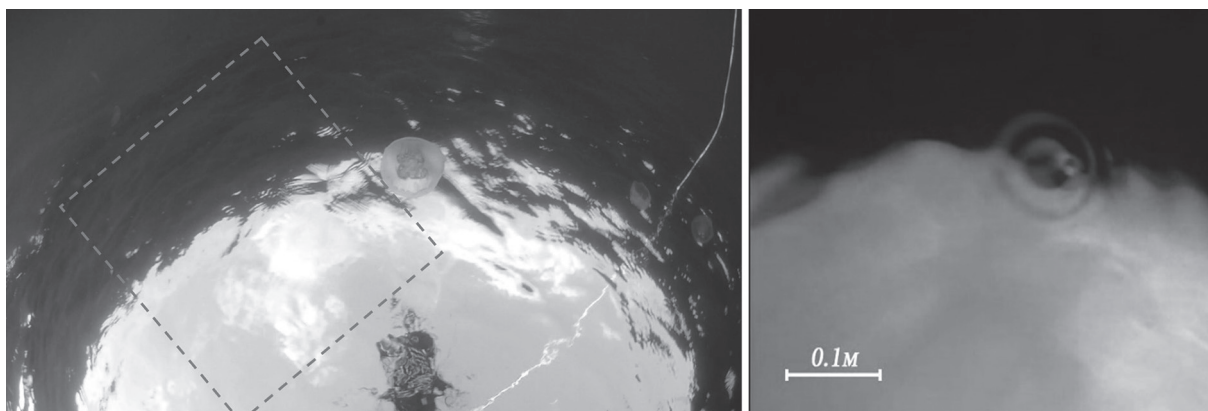


Рис. 1. Примеры проявления мелкомасштабного волнения вблизи границы круга Снеллиуса

Fig. 1. Examples of the small-scale wave manifestation near the boundary of the Snell's window

Под диспарантностью (параллаксом или смещением) понимается разница координат пикселей стереопары, соответствующих одному и тому же объекту. Согласно литературным данным, этот метод успешно работает при диагностике длинноволновой части ветрового волнения с длинами волн до десятков сантиметров. При этом для разрешения соответствующих волн в изображении должны присутствовать маркеры меньших масштабов, которыми выступают гравитационно-капиллярные и капиллярные волны. Более мелкомасштабных естественных маркеров на водной поверхности нет (обрушения не являются надежным маркером). Вместе с тем, при неблагоприятных условиях освещения или не оптимально выбранных параметрах наблюдения капиллярное волнение может быть трудно различимо. Однако даже самые мелкомасштабные волны с длинами порядка миллиметров могут стать высококонтрастным объектом в случае их наблюдения из-под воды под углами близкими к углу полного внутреннего отражения. В качестве примера на рис. 1 представлены изображения ветровой ряби (слева) и упавшей в воду капли дождя на границе круга Снеллиуса (справа) — подводного изображения небосвода [8].

В отсутствие волнения круг очерчивается набором лучей, падающих на морскую поверхность по касательной и испытывающих преломление под углом $\beta_{Sn} = \arcsin(1/m) \approx 48,75^\circ$ в соответствии с законом Снеллиуса (здесь $m \approx 1,33$ — показатель преломления воды). Видимая яркость изображения внутри круга зависит от оптических свойств воды и глубины размещения приемника. По мере приближения к границе круга коэффициент отражения Френеля R_f стремится к единице, а яркость преломленного света, пропорциональная $1 - R_f$, — к нулю. По этой причине изображение круга Снеллиуса представляет собой светлое пятно на темном фоне. Волнение меняет локальный уклон поверхности, приводя к резким вариациям коэффициента отражения Френеля вблизи границы круга Снеллиуса. Соответствующие алгоритмы восстановления параметров волнения (дисперсии уклонов и спектра уклонов) путем статической обработки серии изображений круга Снеллиуса представлены в [9, 10]. Эффективность и точность этих алгоритмов при применении в реальных условиях пока еще до конца не установлены, но две особенности имеют место. Первая особенность заключается в использовании моделей, а значит и приближений при создании рассматриваемых алгоритмов (например, пренебрежение возвышениями поверхности при расчете подводного светового поля, пренебрежение эффектом затенения и др.). Вторая особенность связана с необходимостью обработки массива изображений высокого разрешения (для различения мелкомасштабного волнения), что является ресурсно-затратным процессом. Метод стереонаблюдения лишен этих трудностей и поэтому успешно применяется в широком ряде задач, и в том числе при наблюдении морской поверхности. По этой причине определенный интерес вызывает исследование применимости этого метода для визирования морской поверхности снизу, из-под воды. В такой постановке задача решается впервые. Поэтому ввиду отсутствия натурных изображений предварительная оценка возможностей метода достигается путем анализа модельных изображений круга Снеллиуса, полученных с использованием новой дополненной модели круга Снеллиуса и детерминированного волнения в пренебрежении эффектами рассеяния света в воде. В работе приводятся: модель стереоизображения круга Снеллиуса, примеры расчета стереоизображений и карт диспарантности в зависимости от геометрии наблюдения и ряда параметров камеры, волнения и освещения, а также рекомендации по практической реализации метода.

2. Методы и подходы

2.1. Допущения

Моделирование реалистичных и в то же время математически точных подводных изображений является трудной и затратной по времени задачей, которая при всей внимательности к “деталям” может быть решена только при целом ряде допущений. В зависимости от приложения некоторые из допущений могут быть не важны, а некоторые — принципиально необходимы. Определение и тех и других путем предварительного анализа предшествующих работ по подводному видению одновременно с особенностями стереовидения в машинном зрении видится разумным оптимизирующим шагом, с которого необходимо начать построение модели стереоизображения круга Снеллиуса.

Будем считать, что стереоизображения морской поверхности формируются путем одновременной регистрации углового распределения яркости нисходящего света с помощью двух идентичных синхронизованных идеальных фотоаппаратов с известными характеристиками. Под идеальными понимаются фотоаппараты, в которых отсутствуют собственные шумы, дисторсия объективов пренебрежимо мала, внутренняя и внешняя калибровка стереосистемы, равно как и ректификация изображений не требуются (см., например, [7]). Сделанные упрощения позволяют пропустить ряд этапов, обязательных при обработке натуральных стереоизображений, и подойти непосредственно к процедуре вычисления карт диспарантности, необходимых для восстановления дальности до визируемых элементов морской поверхности.

В настоящий момент существует целый набор методов расчета диспарантности, отличающихся точностью, скоростью и принципом действия (см., например, их сравнительный анализ в [11]). Поиск оптимального метода особенно важен в приложениях машинного зрения, где требуется непрерывная оценка дальностей до объектов в режиме реального времени. Цель настоящего исследования иная, а именно оценка принципиальных возможностей применения стереоизображений круга Снеллиуса для восстановления параметров волнения. По этой причине мы ограничились применением одного широко распространенного метода поиска, а именно Semi-Global Matching (SGM) [12], обеспечивающего компромисс между качеством результатов и временем вычислений. Основными факторами, препятствующими качественному восстановлению карт диспарантности, являются протяженные монотонные области и резкие изменения яркости (разрывы). И те и другие в достаточном количестве присутствуют за границей круга Снеллиуса при малой освещенности, например, в вечернее время (рис. 1, б), или в центральной части круга при малом градиенте яркости неба и малых вариациях коэффициента отражения Френеля (рис. 1, а). Учитывая сказанное, оптимальным кажется участок поверхности вблизи границы круга Снеллиуса, где есть заметный градиент яркости неба и достаточная освещенность нижней стороны морской поверхности за пределами круга. Примером такой области может служить область внутри прямоугольника, отмеченного пунктиром на рис. 1, а.

Внутри рассматриваемой области отчетливо детектируются средне-размерные участки с квазиоднородной на первый взгляд яркостью, а при близком рассмотрении — с уникальной мелкомасштабной насечкой, формируемой капиллярным волнением. Именно благодаря ее наличию рассмотренные методы поиска соответствий приводят в конечном счете к успешному разрешению в рельефе морской поверхности более длинноволновой части волнения, а именно гравитационно-капиллярной. Последняя в свою очередь является маркером для разрешения еще более длинноволновой части волнения и т.д. [7].

Очевидно, что в численном эксперименте качество воссоздания изображений, подобных выделенному фрагменту на рис. 1, а, и с учетом изложенного выше, зависит от детализации рельефа моделируемой морской поверхности. Традиционно для этого применяется суперпозиция плоских волн с детерминированной амплитудой, определяемой по спектру волнения, и случайной фазой. Чем более короткие волны участвуют в формировании волнения, тем более ресурсно-затратным становится расчет. При этом к результатам моделирования остаются традиционные вопросы типа недостаточной «остроты» волнения. Одновременно с этим, необходимость исследования стереоизображений в зависимости от целого набора параметров, а значит необходимость моделирования большого количества изображений высокого разрешения, исключила указанный подход моделирования волнения. Альтернативный вариант заключался в следующем.

2.2. Модель волнения

Основной рельеф поверхности зададим одиночной синусоидальной волной — волной зыби с перестраиваемыми в ходе экспериментов параметрами (амплитудой и длиной волны) и распространяющейся вдоль той же координатной оси, вдоль которой расположены оптические приемники.



Рис. 2. Пример текстуры для создания мелкомасштабных неоднородностей на морской поверхности (слева) и ее крупный план (справа)

Fig. 2. An example of a texture for creating small-scale irregularities on the sea surface (left) and its close-up view (right)

Изображение упавшей в воду капли дождя на рис. 1, б подтолкнуло к идее падающих в воду объектов различных масштабов, генерирующих расходящиеся цилиндрические волны различной интенсивности, длины, крутизны. По этой причине поле неоднородностей средних масштабов воссоздадим набором цилиндрических волн, произвольно раскиданных по заданной координатной сетке и не меняющих положения от эксперимента к эксперименту. Протяженность области распространения каждой волны задаем экспоненциальным законом затухания.

Наиболее мелкомасштабные неоднородности создадим путем оцифровки и масштабирования слабо неоднородной (по яркости) мелкомасштабной текстуры, представленной на рис. 2. Подобные текстуры традиционно используются в системах рендеринга при визуализации объектов для придания им реалистичности. Полученный результат схож с моделированием двумерного белого шума, интенсивность которого должна быть значительно меньше, чем амплитуда неоднородностей средних масштабов. Допустимость предложенного подхода определяется тем, что, как уже отмечалось выше, в стереонаблюдении морской поверхности самое мелкомасштабное волнение является необходимым элементом для восстановления более длинноволновой части. Следовательно, при пересчете восстановленного рельефа в спектр возвышений, последний будет определен на спектральном интервале, не содержащем наиболее короткую часть волнения, что и упрощает требования к ее моделированию.

2.3. Модель изображения круга Снеллиуса с учетом восходящего светового потока

Рассмотрим мгновенный профиль случайной реализации взволнованной водной поверхности, освещенной неполяризованным светом: сверху — светом небосвода, снизу — восходящим из водной толщи светом (рис. 3). Угловое распределение яркости небосвода и водной толщи определим функциями $L_i^\downarrow(\mathbf{n}_i^\downarrow)$ и $L_i^\uparrow(\mathbf{n}_i^\uparrow)$ соответственно, где $\mathbf{n}_i^\downarrow$ и $\mathbf{n}_i^\uparrow$ — горизонтальные компоненты единичных векторов падающего на морскую поверхность света сверху и снизу соответственно, $\Omega_i^\downarrow$ и $\Omega_i^\uparrow$. Рельеф поверхности характеризуем функцией возвышений $z = \zeta(\mathbf{r}_0)$ и вектором уклонов $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{N}_\perp(\mathbf{r}_0)$, который представляет собой горизонтальную составляющую единичной нормали ($\mathbf{N}$) к поверхности S в точке $\mathbf{r}_\Sigma = \mathbf{r}_0 + \zeta(\mathbf{r}_0) \mathbf{e}_z$ и связан с функцией ее возвышений соотношением $\boldsymbol{\eta} = \eta_x \mathbf{x}_0 + \eta_y \mathbf{y}_0 = -\Delta\zeta(\mathbf{e}_z - \text{единичный орт оси } z, \mathbf{r}_0 - \text{радиус вектор проекции точки } \mathbf{r}_\Sigma \text{ на плоскость } z = 0)$. Оптические свойства воды задаем показателем преломления m и ослабления s . Зависимостью этих показателей от длины волны света, температуры и солености воды пренебрегаем.

Считаем, что изображение поверхности формируется с помощью оптического приемника, расположенного в точке $\mathbf{r}_c$ на глубине Z_c и регистрирующего угловое распределение яркости приходящего от поверхности света $L(\mathbf{n})$. Расчет яркости производим в универсальной форме через яркость света на границе раздела и функцию Грина [14], используя ее простейшую модель, полностью игнорирующую вклад рассеянного водой света. В этом приближении мы считаем восходящий поток не результатом многократного рассеяния нисходящего потока света, а считаем его детерминированным и не испытывающим рассеяние. В частности, полагая глубину бесконечной (влияние дна отсутствует) угловое распределение яркости

$$L_{water}|_{z=0}(\mathbf{r}_0, \mathbf{n}) = R_F^\uparrow(\alpha_i^\uparrow(\mathbf{r}_0, \mathbf{n})) L_i^\uparrow(\mathbf{n}_i^\uparrow(\mathbf{r}_0, \mathbf{n})) \quad (9)$$

— яркость отраженного восходящего света на границе раздела $z = 0$ в точке $\mathbf{r}_0 = -\mathbf{n}Z / \sqrt{1-n^2}$,

$$R_F^\uparrow(\alpha_i^\uparrow) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m\sqrt{1-\alpha_i^{\uparrow 2}} - \sqrt{1-m^2\alpha_i^{\uparrow 2}}}{m\sqrt{1-\alpha_i^{\uparrow 2}} + \sqrt{1-m^2\alpha_i^{\uparrow 2}}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1-\alpha_i^{\uparrow 2}} - m\sqrt{1-m^2\alpha_i^{\uparrow 2}}}{\sqrt{1-\alpha_i^{\uparrow 2}} + m\sqrt{1-m^2\alpha_i^{\uparrow 2}}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

— коэффициент отражения Френеля для неполяризованного света,

$$\alpha_i^\uparrow(\mathbf{r}_0, \mathbf{n}) = \sin \vartheta_i^\uparrow = \sqrt{1 - \left(\sqrt{1-n^2} \sqrt{1-\eta(\mathbf{r}_0)^2} - \mathbf{n} \boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}_0) \right)^2} \quad (11)$$

— синус локального угла падения,

$$L_i^\uparrow(\mathbf{n}_i^\uparrow(\mathbf{r}_0, \mathbf{n})) = L_i^{\uparrow 0} \quad (12)$$

— изотропное угловое распределение яркости водной толщи,

$$\mathbf{n}_i^\uparrow(\mathbf{r}_0, \mathbf{n}) = \frac{1}{1+\eta^2} \left[\mathbf{n} + \sqrt{1-n^2} \boldsymbol{\eta} + \eta \sqrt{1+\eta^2 - \left(\mathbf{n} + \sqrt{1-n^2} \boldsymbol{\eta} \right)^2} \right] \quad (13)$$

— горизонтальная компонента единичного вектора, падающего снизу на морскую поверхность света $\boldsymbol{\Omega}_i^\uparrow$.

На практике вместо переменной $\mathbf{n}$ в формуле (1) и далее удобнее использовать цилиндрические координаты (ϑ, φ, z) и декартовы координаты (x, y, z) , связанные соотношениями:

$$n_x = -x / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad n_y = -y / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (14)$$

$$\vartheta = \arcsin(n), \quad \varphi = \operatorname{tg}(n_y/n_x). \quad (15)$$

Приведенный набор формул описывает угловое распределение яркости нисходящего от поверхности света, источниками которого служат свет неба и свет водной толщи, обратно рассеянный поверхностью в нижнюю полусферу.

2.4. Модель стереоизображения круга Снеллиуса

В настоящей работе мы рассмотрим одну из возможных схем подводного наблюдения. Для упрощения ее схематичное представление выполнено на примере плоскости xz (рис. 5). Считаем, что две камеры расположены в плоскости xz на одной глубине Z_c на удалении (базе) b друг от друга в направлении оси x , совпадающей с направлением распространения волнения. Камеры ориентированы под углом β к вертикальной оси и имеют поле зрения, определяемое углом 2α . Фокусное расстояние камер принимаем равным f , размер матрицы — $m_x \times m_y$, разрешение матрицы — $p_x \times p_y$, кроп-фактор — s . Первая камера визирует участок поверхности протяженностью A_1B_1 , вторая — A_2B_2 . Протяженность участка, перекрываемого обеими камерами, обозначим через A_2B_1 . Рассмотрим на нем произвольную точку D , положение которой на первой матрице характеризуем парой координат (u_1, v_1) , на второй — (u_2, v_2) . Связь между направлением на визируемый элемент морской поверхности и его координатами (в пикселях) на изображении следует из геометрии на рис. 4.

$$u_i = \frac{p_x}{m_x} \left(\frac{m_x}{2} - f \tan(\vartheta_i - \beta) \right), \quad (16)$$

$$v_i = \frac{p_y}{m_y} \left(\frac{m_y}{2} + f \frac{\tan(\varphi_i)}{\cos(\vartheta_i - \beta)} \right). \quad (17)$$

Расчеты, выполненные по формулам (1)–(17), формируют основу расчета стереоизображения круга Снеллиуса. Разницу между координатами одного и того же элемента изображений принимаем за искомую диспаратность d .

2.5. Моделирование

Процесс моделирования стереоизображений круга Снеллиуса осуществлялся пошагово. Первоначально определялись внутренние параметры камеры на примере типовой зеркальной камеры Nikon D5100 с объ-

ektivом Nikkor 18–55 мм по причине ее регулярного использования нами в натурных измерениях: $2\alpha = 60^\circ$, $f = 25$ мм, $m_x \times m_y = 23,6 \times 15,8$ мм, $p_x \times p_y = 2144 \times 1424$ пикселей, $s = 1,5$. Далее задавались параметры воды (показатели ослабления и преломления) и внешние параметры камеры: глубина погружения Z_c м и угол наклона β относительно вертикали (см. значения в табл. 1). Последний чаще всего определялся значением $\beta = \beta_{Sn} - 10^\circ$, что позволяло получить в кадре участок поверхности примерно одинаковой протяженности относительно границы круга Снеллиуса. Третьим шагом вычислялись границы визируемого участка в декартовых координатах и задавалась равномерная сетка с разрешением $p_x \times p_y$. На заданной координатной сетке рассчитывался рельеф морской поверхности, причем положение цилиндрических волн всегда было фиксировано, а параметры зыби от эксперимента к эксперименту менялись между двумя вариантами значений, обеспечивающих не только разный масштаб волн, но и их крутизну (см. табл. 1). Далее рельеф пересчитывался в поле уклонов $\eta(\mathbf{r})$, которое в свою очередь использовалось для построения по формуле (1) угловых распределений видимой яркости поверхности, «регистрируемых» каждой камерой. Последним шагом осуществлялся расчет стереоизображений круга Снеллиуса по формулам (16) и (17).

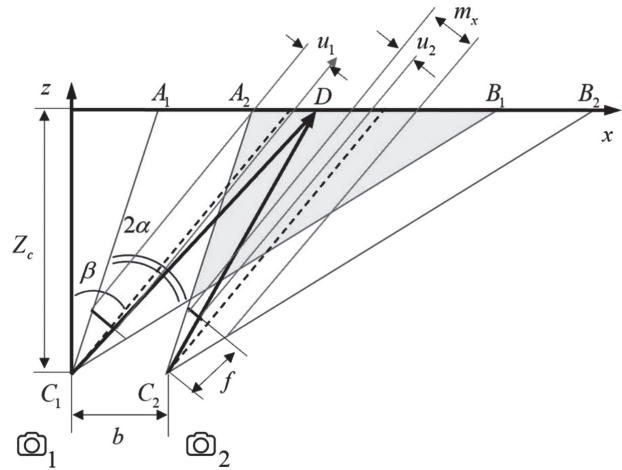


Рис. 4. Геометрия наблюдения морской поверхности подводной стереосистемой

Fig. 4. Geometry of the sea surface observation by an underwater stereo system

Таблица 1
Table 1

Основные параметры задачи и их значения
The main parameters and its values

Внутренние параметры камеры				
Угол зрения	30°; 60°			
Фокусное расстояние	50 мм; 25 мм			
Размер матрицы	23,6 × 15,8 мм			
Разрешение	2144 × 1424			
Кроп-фактор	1,5			
Внешние параметры стерео системы				
Глубина расположения	2 м; 5 м			
Стереο база	0,05 м; 0,2 м; 0,5 м			
Наклон камеры от вертикали	38,75°; 58,75°			
Параметры волнения				
Синусοидальная волна	Амплитуда, м	Длина, м	Наклон, °	
	0,06	1	20	
	0,006	0,3	8	
Цилиндрические волны	Амплитуда, м	Длина, м	Наклон, °	
	№ 1	0,031	0,314	19
	№ 2	0,019	0,128	27
	№ 3	0,075	0,251	45
	№ 4	0,013	0,251	10
	№ 5	0,036	0,180	18
	№ 6	0,006	0,063	17
	№ 7	0,013	0,063	33
	№ 8	0,017	0,042	53
	№ 9	0,013	0,126	18
	№ 10	0,013	0,063	33
№ 11	0,189	0,628	44	

Цилиндрические волны	Амплитуда, м	Длина, м	Наклон, °
№ 12	0,025	0,084	46
№ 13	0,075	0,251	43
№ 14	0,126	0,251	57
№ 15	0,126	0,628	33
Оптические свойства воды			
Показатель преломления	1,33 1/м		
Показатель ослабления	0,33 1/м		
Параметры метода поиска диспарантности			
Метод	Semi-Global Matching (SGM)		
Диапазон вариаций диспарантности	128		
Окно поиска	5 пикселей		

В качестве примера на рис. 5 представлен результат расчета изображений с учетом текстуры (мелкомасштабного волнения) и без нее.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Угловые распределения видимой яркости поверхности

Представление результатов стоит начать с рассмотрения примеров расчета видимой яркости поверхности по формуле (1) для двух глубин 2 м (рис. 6) и 5 м (рис. 7) при разных параметрах зыби. Сплошной дугой отмечена граница невозмущенного круга Снеллиуса. По осям отложены зенитный и азимутальный углы.

Относительно небольшой формат представленных изображений не позволяет разглядеть мелкие детали в структуре изображений, но его вполне достаточно, чтобы увидеть различия в яркостях наиболее протяженных элементов и изменении формы средних по размеру светлых и темных пятен (сопоставлены пунктирными линиями-стрелками), физика которых пояснялась в начале работы, вплоть до их практически полного исчезновения (сопоставлены сплошными линиями-стрелками). Подобные пары изображений использовались для построения карт диспарантности и оценки их качества в зависимости от вариаций параметров задачи.

3.2. Карты диспарантности и их изменчивость при вариациях стереобазы

Рассмотрим результаты расчета карт диспарантности на примере двух вариантов волнения (параметры указаны на рис. 7 и 8) при трех значениях стереобазы — 0,05 м, 0,2 м, 0,5 м и двух значениях глубины 2 м (рис. 7) и 5 м (рис. 8). Шкала диспарантности представлена в пикселях. Видно, что при меньшей глубине и малой стереобазе порядка трети площади карты не имеет разрывов, в структуре прослеживаются расходящиеся цилиндрические волны. С увеличением базы качество карты падает, появляется множество разрывов. Ситуация от части становится лучше на большей глубине. Здесь при малой стереобазе отчетливо прослеживается структура зыби и наиболее крупных цилиндрических волн, хотя вариации диспарантности не велики. С увеличением базы увеличивается количество пропусков в карте, теряется информация о цилиндрических волнах, но растут вариации диспарантности, связанные с зыбью. На практике, используя специальные алгоритмы постфильтрации карт, устраняющиеся разрывы, профиль волны зыби может быть восстановлен достаточно детально. При дальнейшем увеличении стереобазы количество разрывов продолжает расти, а корректные вариации диспарантности наблюдаются при больших дальностях, что сохраняет возможность восстановления параметров зыби по удаленной области изображения. Для получения корректных значений диспарантности на малых дальностях потребуется повторная процедура поиска соответствий при больших вариациях диспарантности (256 или 512), которая может потребовать значительного увеличения времени счета.

3.2.1. Карты диспарантности и их изменчивость при вариациях фокусного расстояния (угла обзора)

Согласно теории стереовидения диспарантность линейно растет пропорционально произведению стереобазы и фокусного расстояния [15]. В связи с этим и на основании полученных сведений о влиянии стереобазы, кажется интересным оценить влияние вариаций фокусного расстояния. Рассмотрим случай двукратного увеличения фокусного расстояния, сопровождающегося обужением поля зрения до 30° против

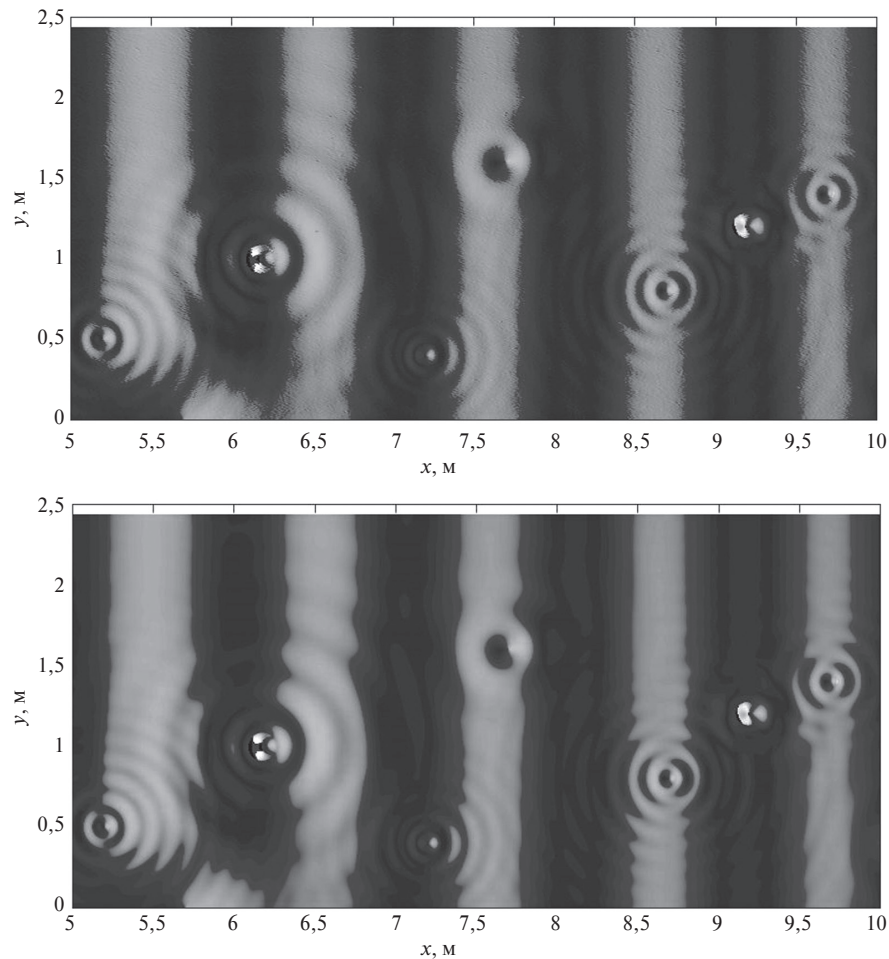


Рис. 5. Пример расчета изображений морской поверхности с учетом мелкомасштабных неоднородностей (вверху) и без них (внизу)

Fig. 5. An example of the simulated sea surface relief with small-scale irregularities (above) and without them (below)

60° ранее. Пунктирные прямоугольники на представленных ранее изображениях круга Снеллиуса (рис. 7 и 8) демонстрируют насколько обузился визируемый участок поверхности. Детальные изображения этих участков представлены в верхних рядах на рис. 9 и 10. Сравнение карт диспарантности с предшествующими на рис. 7 и 8 позволяет заключить, что вариации диспарантности действительно выросли в два раза. Наблюдаемый рост наиболее полезен с точки зрения повышения детализации восстанавливаемого рельефа морской поверхности при ее наблюдении с большей глубины при маленькой стереобазе. При среднем значении стереобазы значения диспарантности при малых углах визирования, т.е. при малой дальности (внутри границы круга Снеллиуса) уходят в ограничения. Одновременно с этим при больших дальностях становятся различимы как волны наиболее короткой зыби, так и цилиндрические волны (правый рисунок для случая $b = 0,2$ м). При большей стереобазе карта диспарантности сильно зашумлена и разрывна, а потому вряд ли окажется полезной при решении обратной задачи.

3.2.2. Карты диспарантности в зависимости от мелкомасштабной составляющей волнения

Рассмотрим влияние мелкомасштабной части волнения, не традиционно смоделированной в виде белого шума, на качество расчета карт диспарантности на примере двух вариантов зыби, двух глубин и двух значений стереобаз (рис. 11 и 12). Не трудно видеть, что при большей глубине и малой стереобазе в структуре карты, построенной без учета мелкомасштабного волнения, присутствует большее количество шумов и отсутствует информация о цилиндрических волнах (рис. 11, ряды 2 и 3). При меньшей глубине ситуация обратная (рис. 12, ряды 2 и 3). При большей стереобазе в обоих случаях лучшее качество карт диспарантности наблюдается в случае пренебрежения мелкомасштабным волнением. Восстанавливаемые карты содержат

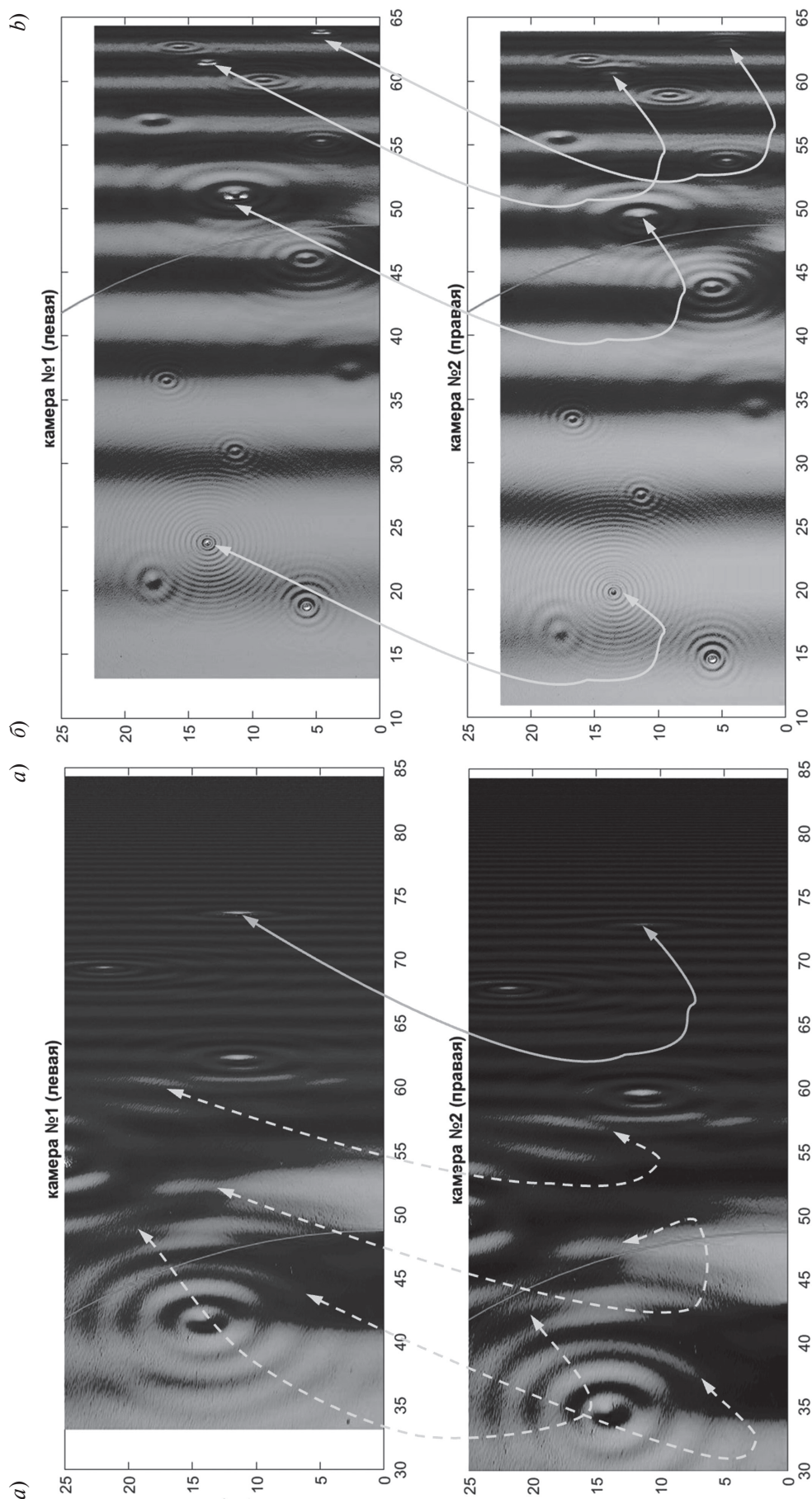


Рис. 6. Угловые распределения яркости морской поверхности вблизи границы круга Снеллиуса, визуруемые каждой из камер, с двух глубин — 2 м (а) и 5 м (б) при различных параметрах зыби и ориентировании камер: а — глубина 2 м, стереобаза 0,2 м, длина волны зыби — 0,3 м, амплитуда 0,02 м, угол наклона камеры от вертикали — 58,75°; б — глубина 5 м, стереобаза 0,2 м, длина волны зыби — 1 м, амплитуда 0,06 м, угол наклона камеры от вертикали — 38,75°

Fig. 6. Angular distributions of the sea surface radiance near the Snell's window, as seen by each of the cameras, from two depths — 2 m (a) and 5 m (b) with different swell parameters and camera orientation. а — depth is 2 m, stereo base is 0.02 m, swell amplitude is 0.02 m, swell wavelength is 0.3 m, camera inclination from zenith is 58.75°; б — depth is 5 m, stereo base is 0.2 m, swell wavelength is 1 m, swell amplitude is 0.06 m, camera inclination from zenith is 38.75°

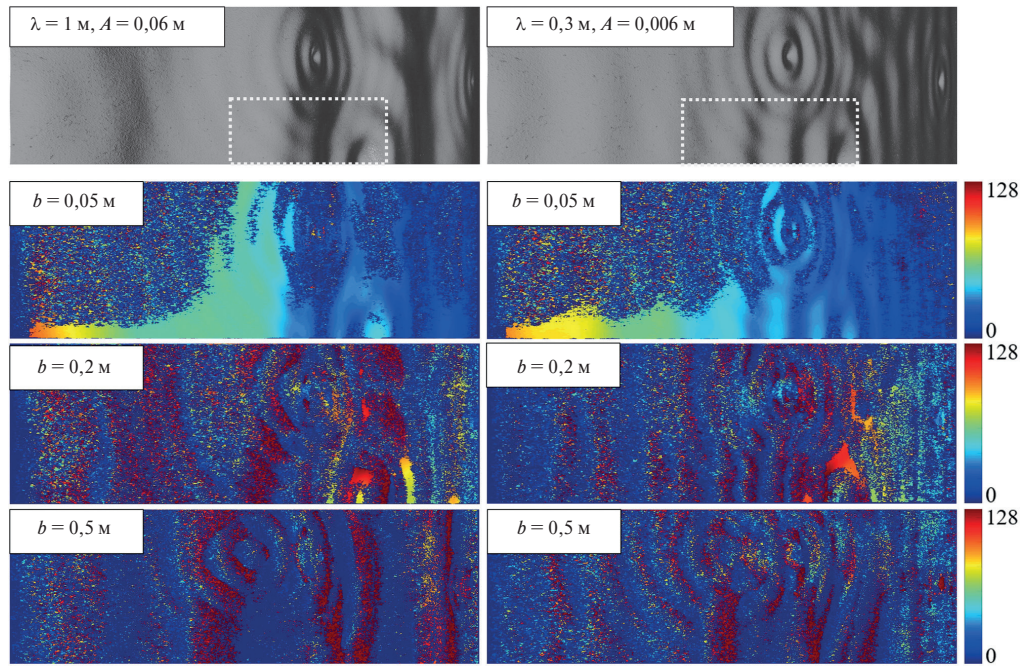


Рис. 7. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (верхний ряд) и карт диспарантности для глубины 2 м, поля зрения 60°, трех значений стереобазы b (значения указаны на рисунке) и двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке). Шкала диспарантности представлена в пикселах

Fig. 7. The result of calculating the Snell's window images (top row) and disparity maps for a depth of 2 m, a field of view of 60°, three values of the stereo base (values are shown in the figure) and two swell options (parameters are shown in the figure). The disparity scale is presented in pixels

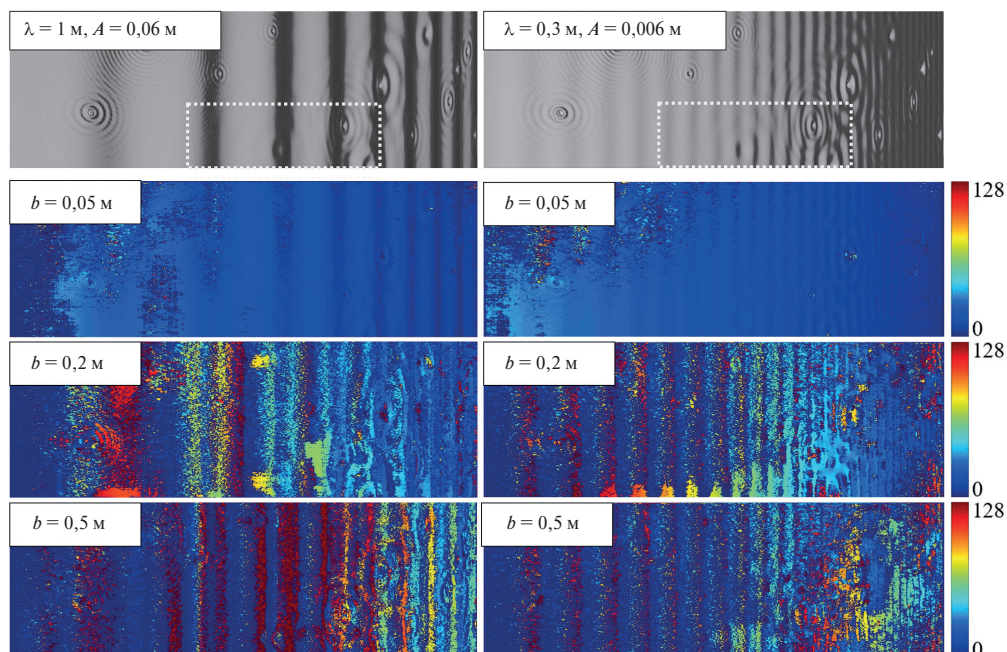


Рис. 8. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (верхний ряд) и карт диспарантности для глубины 5 м, поля зрения 60°, трех значений стереобазы b (значения указаны на рисунке) и двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке). Шкала диспарантности представлена в пикселах

Fig. 8. The result of calculating the Snell's window images (top row) and disparity maps for a depth of 5 m, a field of view of 60°, three values of the stereo base (values are shown in the figure) and two swell options (parameters are shown in the figure). The disparity scale is presented in pixels

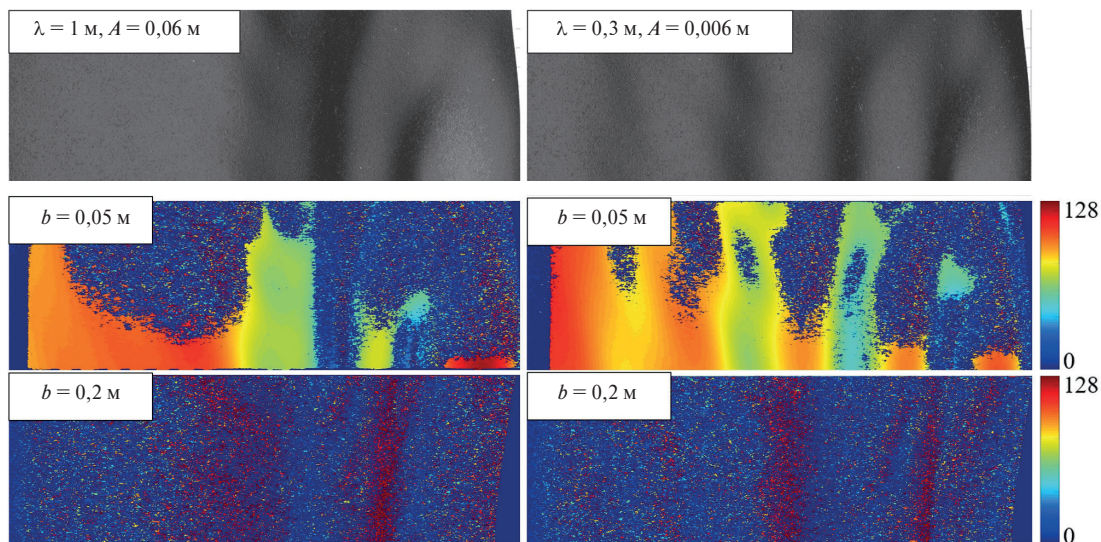


Рис. 9. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (верхний ряд) и карт диспарантности для глубины 2 м, поля зрения 30°, трех значениях стереобазы b (значения указаны на рисунке) и двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке). Шкала диспарантности представлена в пикселах

Fig. 9. The result of calculating the Snell's window images (top row) and disparity maps for a depth of 5 m, a field of view of 30°, three values of the stereo base (values are shown in the figure) and two swell options (parameters are shown in the figure). The disparity scale is presented in pixels

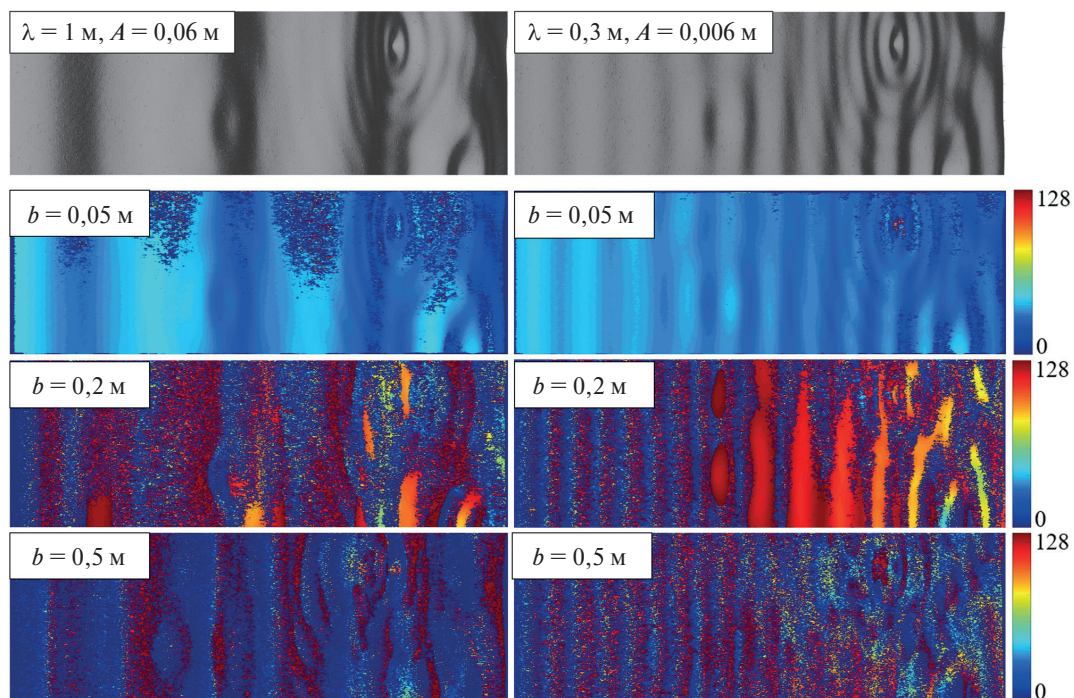


Рис. 10. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (верхний ряд) и карт диспарантности для глубины 5 м, поля зрения 30°, трех значениях стереобазы b (значения указаны на рисунке) и двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке). Шкала диспарантности представлена в пикселах

Fig. 10. The result of calculating the Snell's window images (top row) and disparity maps for a depth of 2 m, a field of view of 30°, three values of the stereo base (values are shown in the figure) and two swell options (parameters are shown in the figure). The disparity scale is presented in pixels

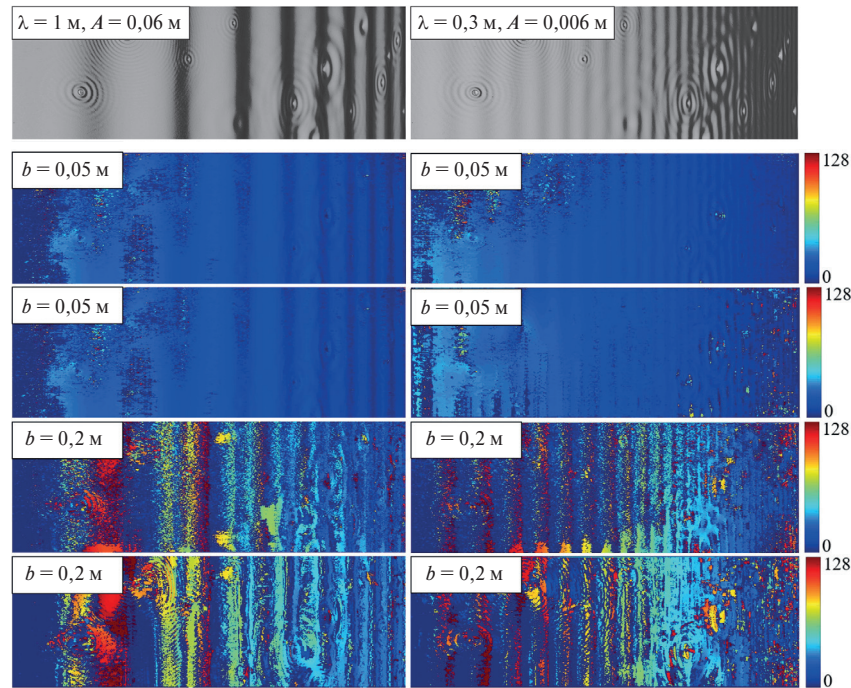


Рис. 11. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (ряд 1) и соответствующих им карт диспарантности с учетом мелкомасштабного волнения (ряды 2 и 4) и без него (ряды 3 и 5) для двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке) с глубины 5 м и при двух значениях стереобазы b (значения указаны на рисунке)

Fig. 11. The result of calculating the Snell's window images (row 1) and disparity maps, taking into account small-scale waves (rows 2 and 4) and without it (rows 3 and 5) for a depth of 5 m, two values of the stereo base (the values are shown in the figure) and two variants of swell (parameters are shown in the figure)

меньшее количество разрывов и не требуют дополнительной постфильтрации. Вместе с тем, любопытно отметить проявление мало интенсивных цилиндрических волн на малых дальностях в структуре карт диспарантности для большей глубины и большей базы (рис. 11, ряд 5).

Продемонстрированный пример указывает на то, что, возможно, использованный подход с представлением мелкомасштабного волнения белым шумом не является оптимальным по причине недостаточной связанности в пространстве соседних элементов «генерируемой» волны. Ответить на этот вопрос планируется в следующем исследовании, где несмотря на временные затраты, мы попробуем смоделировать волнение на максимально широком спектральном интервале с использованием традиционных алгоритмов моделирования ветрового волнения.

4. Заключение

В работе на качественном уровне рассмотрена принципиальная возможность использования стереоизображений круга Снеллиуса применительно к задаче дистанционной диагностики волнения. Задача рассматривалась впервые, поэтому ввиду отсутствия натуральных изображений, использовались возможности численного счета на базе предложенной модели стереоизображения круга Снеллиуса. Упомянутая возможность оценивалась по качеству построения карт диспарантности в зависимости от условий волнения, освещения, а также параметров камеры и наблюдения. Значения всех параметров брались максимально близкими к реальным условиям и используемой фототехнике, чтобы результаты расчетов могли быть полезны в качестве предварительной вспомогательной информации для успешной регистрации изображений круга Снеллиуса в реальных морских условиях. При этом камеры считались идеальными, что позволило избежать калибровки стереосистемы и ректификации изображений, необходимых при работе с натурными изображениями.

Полученные результаты указывают на то, что метод применим для регистрации гравитационно-капиллярной части волнения с глубин, где в морских условиях влиянием рассеяния и поглощения света в воде можно пренебречь. При этом регистрация изображений должна осуществляться таким образом, чтобы яркость нижней стороны морской поверхности за пределами границы круга Снеллиуса (то есть при визировании под углами большими угла полного внутреннего отражения) была значительной.

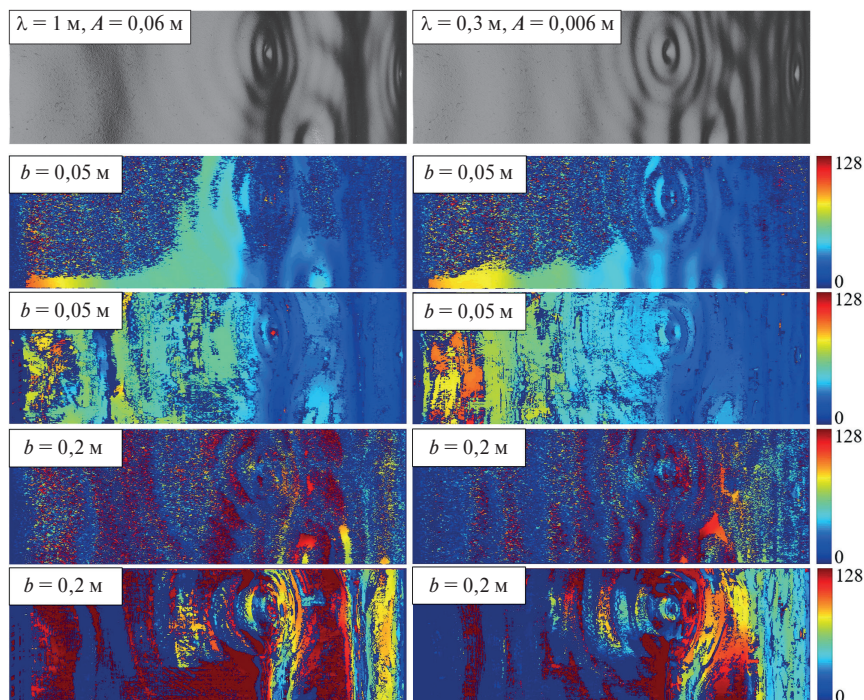


Рис. 12. Результат расчета изображений круга Снеллиуса (ряд 1) и соответствующих им карт диспарантности с учетом мелкомасштабного волнения (ряды 2 и 4) и без него (ряды 3 и 5) для двух вариантов зыби (параметры указаны на рисунке) с глубины 2 м и при двух значениях стереобазы b (значения указаны на рисунке)

Fig. 12. The result of calculating the Snell's window images (row 1) and disparity maps, taking into account small-scale waves (rows 2 and 4) and without it (rows 3 and 5) for a depth of 2 m, two values of the stereo base (the values are shown in the figure) and two variants of swell (parameters are shown in the figure)

Важно отметить, что, по нашему мнению, в силу того что рассмотренная для численного счета задача достаточно идеализирована, вопрос восстановления дальностей до элементов поверхности через рассмотренную карту диспарантности должен решаться с использованием натуральных изображений и учитывать все необходимые для этого действия, рекомендуемые теорией стереовидения. По этой причине данный шаг не рассматривался в настоящем исследовании, но запланирован в качестве будущих работ.

5. Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60034 (The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-60034).

Литература

1. Cox C., Munk W. Measurements of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun Glitter // Journal of the Optical Society of America. 1954. No 44. P. 838–850.
2. Баханов В.В., Демакова А.А., Кориненко А.Е., Рябкова М.С., Титов В.И. Оценка спектров ветровых волн с длинами волн от сантиметров до метра по изображениям поверхности моря // Морской гидрофизический журнал, 2018. Т. 34, № 3. С. 192–205. doi: 10.22449/0233-7584-2018-3-192-205
3. Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B., Collard F., Donlon C. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation // Journal of Geophysical Research: Oceans 122. 2017. No 2. P. 1369–1383. doi: 10.1002/2016JC012425
4. Banner M.L., Jones S.F., Trinder J.C. Wavenumber spectra of short gravity waves // Journal of Fluid Mechanics. 1989. Vol. 198. P. 321–344. doi: 10.1017/S0022112089000157
5. Shemdin O.H., Tran H.M. Measuring Short Surface Waves with Stereography // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1992. Vol. 58. P. 311–316.
6. Benetazzo A. Measurements of short water waves using stereo matched image sequences // Coastal Engineering. 2006. Vol. 53, No 12. P. 1013–1032. doi: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.012

7. Косник М.В., Дулов В.А., Малиновский В.В., Смолов В.Е., Погребной А.Е. Оценка двумерных пространственных спектров коротких волн с помощью стереофотосъемки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2009, № 19. С. 401–414.
8. Мольков А.А., Долин Л.С. Определение характеристик ветрового волнения по подводному изображению морской поверхности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012. Т. 48, № 5. С. 617–630.
9. Molkov A.A. Retrieval of slope spectrum of sea roughness by Snell's window imagery: theory and numerical experiment (one-dimensional sea roughness) // Proceedings SPIE11529, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2020, 115290C. doi: 10.1117/12.2573949
10. Мольков А.А., Долин Л.С. Определение дисперсии уклонов взволнованной водной поверхности по размытию границы круга Снеллиуса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2013. Т. 49, № 5. С. 615–626. doi: 10.7868/S0002351513050076
11. Vieira G. d. S. et al. Stereo Vision Methods: From Development to the Evaluation of Disparity Maps // 2017 Workshop of Computer Vision (WVC). 2017. P. 132–137. doi: 10.1109/WVC.2017.00030
12. MatLab. Block Matching. URL: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ref/blockmatching.html> (дата обращения: 31.08.2021).
13. MatLab. Semi-Global Matching. URL: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ref/disparitysgm.html> (дата обращения: 31.08.2021).
14. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991.
15. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004. 700 p. doi: 10.1017/S0263574700223217

References

1. Cox C., Munk W. Measurements of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun Glitter. *Journal of the Optical Society of America*. 1954, 44, 838–850.
2. Bakhanov V.V., Demakova A.A., Korinenko A.E., Ryabkova M.S., Titov V.I. Estimation of the wind wave spectra with centimeters-to-meter lengths by the sea surface images. *Physical Oceanography* [e-journal]. 2018, 25(3), 177–190. doi: 10.22449/1573-160X-2018-3-177-190
3. Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B., Collard F., Donlon C. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 122, 2017, 2, 1369–1383. doi: 10.1002/2016JC012425
4. Banner M.L., Jones S.F., Trinder J.C. Wavenumber spectra of short gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*. 1989, 198, 321–344. doi: 10.1017/S0022112089000157
5. Shemdin O.H., Tran H.M. Measuring Short Surface Waves with Stereography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1992, 58, 311–316.
6. Benetazzo A. Measurements of short water waves using stereo matched image sequences. *Coastal Engineering*. 2006, 53, 12, 1013–1032. doi: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.012
7. Kosnik M.V., Dulov V.A., Malinovskij V.V., Smolov V.E., Pogrebnoj A.E. Estimation of two-dimensional spatial spectra of short waves using stereo photography. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoj i Shel'fovoj Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa*. 2009, 19, 401–414 (in Russian).
8. Molkov A.A., Dolin L.S. Determination of wind roughness characteristics based on an underwater image of the sea surface. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48, 552–564. doi: 10.1134/S0001433812050088
9. Molkov A.A. Retrieval of slope spectrum of sea roughness by Snell's window imagery: theory and numerical experiment (one-dimensional sea roughness). *Proc. SPIE11529, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions* 2020, 115290C. doi: 10.1117/12.2573949
10. Molkov A.A., Dolin L.S. Determination of the variance of rough water surface slopes by the distortions of Snell's circle boundary. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, 49 (5), 567–577. doi: 10.1134/S0001433813050071
11. Vieira G. d. S. et al. Stereo Vision Methods: From Development to the Evaluation of Disparity Maps. *2017 Workshop of Computer Vision (WVC)*. 2017, 132–137. doi: 10.1109/WVC.2017.00030
12. MatLab. Block Matching. URL: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ref/blockmatching.html> (date of access: 31.08.2021).
13. MatLab. Semi-Global Matching. URL: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ref/disparitysgm.html> (date of access: 31.08.2021).
14. Dolin L.S., Levin I.M. Theory of underwater vision. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1991, 230 p. (in Russian).
15. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. *Cambridge University Press*, 2004. 700 p. doi: 10.1017/S0263574700223217