

РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ И МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПАТТЕРНА ДЛЯ НАВИГАЦИИ АНПА

Н.А. Будко, В.В. Пивнев, А.Ю. Будко, А.Д. Караев, А.И. Стаценко, Я.В. Кабачевский

В последнее время АНПА получают все большее распространение в самых разных областях деятельности человека. Наиболее актуальна данная тематика для проведения исследований морских глубин, а также в сфере мониторинга состояния и обеспечения безопасности подводных коммуникаций. При этом навигация АНПА является сложной задачей, что делает актуальными новые методы ее осуществления. В данной работе рассмотрены общие вопросы подводной навигации на основе поляризационного паттерна. По обзорам авторитетных источников показана возможность навигации на базе анализа поляризации проходящего под воду солнечного света и знания точного мирового времени и даты. Далее показана разработка собственной системы подводного видения с применением поляризационной и цветной камер. В завершении работы приведен результат испытаний разработанной системы подводного видения по получению подводных снимков и анализу данных поляризационного паттерна в целях навигации АНПА. При обработке данных в целях обнаружения навигационного поляризационного паттерна предложен метод формирования изображения в цветовом пространстве HSV на основе рассчитанных для кадра данных о степени линейной поляризации, углах линейной поляризации и интенсивности пикселей. В целом сделан вывод о том, что разработанная система подводного видения и метод формирования поляризационного паттерна позволяет производить регистрацию значимых данных о поляризации подводного света для осуществления целей навигации АНПА.

Ключевые слова: АНПА, навигация, поляризация световых волн, системы подводного видения

Введение

В природе явление поляризации используется некоторыми животными, насекомыми и растениями для поиска пищи и навигации. Например, осьминоги используют поляризационное зрение (чувствительность к поляризованным волнам) для демаскировки и добычи прозрачных беспозвоночных, а пчелы используют поляризацию неба для навигации после захода солнца. Исследование поляризационного зрения животных и построение биоинспирированных технических систем поляризационного видения является актуальной задачей сегодняшнего дня, что подтверждается большим числом публикаций в высокорейтинговых журналах [1–8].

Сложность поляризационной картины мира, процессов поляризации естественного света и соответ-

ствующих физических моделей обуславливают трудности интерпретации поляризационной информации, особенно в условиях ограничения вычислительной мощности и отсутствия дополнительной информации в условиях функционирования на борту АНПА. Новый импульс развития системы на базе поляризационного видения могут получить на основе методов искусственного интеллекта. При этом развитие алгоритмов машинного обучения в области решения задач обработки изображений делает актуальной задачу комплексирования данных различных поляризационных каналов в единое изображение, подаваемое на вход сверточных нейронных сетей [8].

Целью настоящей работы является разработка системы подводного видения на базе поляризационной камеры с коммерчески доступным датчиком и алгоритмов обработки сигнала для идентификации поляриза-

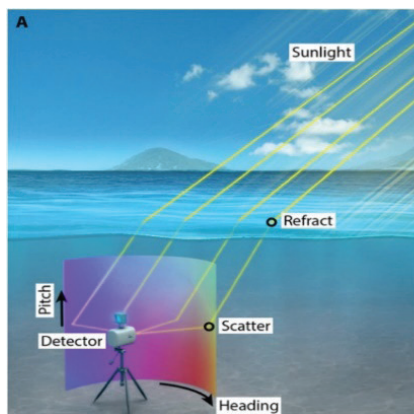
ционного паттерна. Получаемый поляризационный паттерн должен иметь высокий отклик на изменения положения системы по курсу, выделять информацию о поляризации из исходного сигнала и иметь матричную структуру, подходящую для обработки математическим аппаратом сверточных нейронных сетей.

■ Обзор работ по подводной навигации на основе информации о поляризации световых волн естественного света, проникающих с поверхности

Морские животные могут использовать поляризационные модели неба, видимые из под воды, в качестве компаса для целей навигации [1]. Подводные поляризационные световые паттерны достаточно сильно структурированы и зависят от положения Солнца, а также могут использоваться для целей навигации и геолокации АНПА. С помощью био-инспирированного поляризационно-чувствительного формирователя изображений можно определить геолокацию наблюдателя на основе радиальных диаграмм подводной поляризации [2]. Экспериментальные данные [2], записанные в разных местах по всему миру, на разной глубине и в разное время суток, показывают, что средняя точность геолокации на основе поляризации подводного света составляет 6 метров погрешности на каждый пройденный километр. Это экспериментальное исследование открывает новое направление в подводной навигации на большие расстояния и предлагает дополнительные механизмы, с помощью которых АНПА с поляризационно-чувствительной СТЗ могут выполнять как локальную, так и дальнюю навигацию (рис. 1) [2].

Для наглядности на графики рис. 1 наложены линии, ориентированные под углами поляризации. Нейтральные точки в поляризации возникают там, где состояние поляризации события рассеяния отменяет состояние поляризации преломления.

Рис. 1. Схема поляризационных диаграмм в воде. (А) Цилиндр показывает состояния поляризации, наблюдаемые детектором, в ложном цвете. (В) Состояния поляризации, предсказанные моделью однократного рассеяния, в ложном цвете (см. Ключ справа) для возвышений Солнца на 10° , 45° и 80° над горизонтом [2]



Другой тип навигации, который можно найти в водной среде, – это обнаружение берега и движение в сторону или от открытых вод [3]. Способность обнаруживать далекий берег, исследуя разницу поляризации между светом, исходящим от него и из открытых вод, основана на особенностях рассеяния нисходящего света (рис. 2) [3].

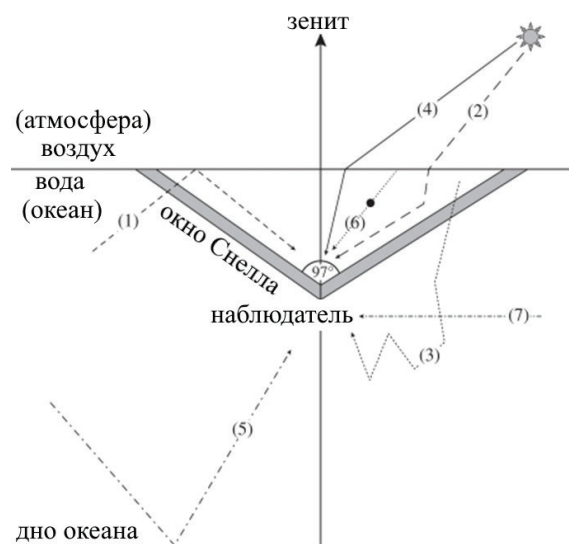
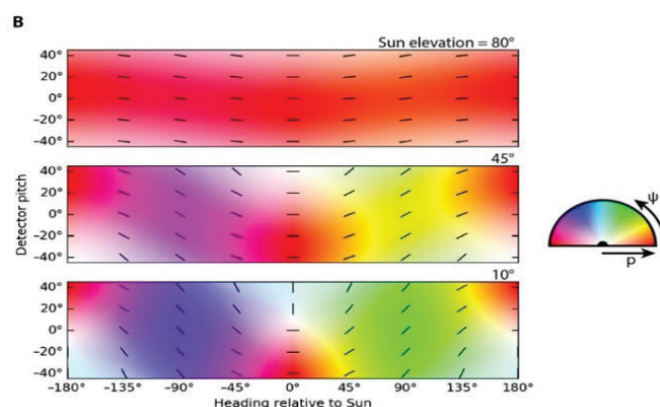


Рис. 2. Процессы, влияющие на подводную поляризацию естественного освещения: 1 – внутреннее отражение от морской поверхности, 2 – однократное рассеяние, 3 – многократное рассеяние, 4 – преломление прямого света при переходе от воздуха к воде, 5 – отражение от морского дна, 6 – прямое рассеяние и 7 – ослабление поляризованного света. Толстые серые линии очерчивают границы окна Снелла с углом приема 97° [3, с переводом]

Луч, падающий под определенным углом к отражающей поверхности, при отражении полностью поляризуется в плоскости, параллельной этой поверхности согласно закону Брюстера. Закон Брюстера гласит, что максимальная поляризация (колебание только в одной плоскости) луча света может быть достигнута, если позволить лучу упасть на поверхность прозрачной среды таким образом, чтобы преломлен-



ный луч составлял угол 90° с отраженным лучом, (рис. 3).

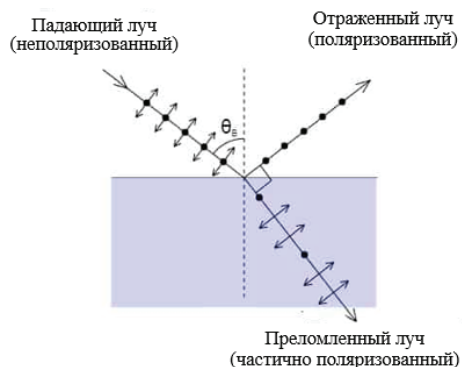


Рис. 3. Иллюстрация поляризации отражённого света, падающего на границу раздела сред под углом Брюстера

Таким образом, закон Брюстера гласит, что можно достичь максимальной поляризации света, позволив лучу упасть на прозрачную поверхность среды так, чтобы преломленный луч стал перпендикулярным отраженному лучу. Он устанавливает взаимосвязь между углом поляризации и показателем преломления, при этом тангенс поляризационного угла численно равен показателю преломления среды.

На основе моделей подводной поляризации можно определить направление и углы возвышения Солнца и, следовательно, положение наблюдателя можно оценить на основе точного знания времени и даты. Чтобы проверить эту гипотезу, авторами [4] собраны данные для определения положения Солнца по углам подводной поляризации с помощью биоинспирированного поляриметра изображения видимого спектра. Датчик имитирует поляризационно-чувствительную систему зрения креветки-богомолла за счет интеграции различной поляризационной оптики в отдельные пиксели камеры. В частности, поляризационные фильтры, состоящие из параллельных алюминиевых нанопроволок (140 нм толщиной и шири-

ной 70 нм), выравниваются и наносятся на каждый пиксель 2-мегапиксельного датчика изображения устройства с зарядовой связью с низким уровнем шума. Подобно своему биологическому аналогу, пиксельные поляризационные фильтры ориентированы под заданными углами 0° , 45° , 90° и 135° в повторяющейся схеме 2×2 в фокальной плоскости. Это позволяет поляриметру регистрировать изображения интенсивности, частичной поляризации и поляризационного угла (рис. 4) [2].

Модели подводной поляризации являются результатом положения солнца относительно места, где были собраны записи. Авторы обнаружили, что могут использовать подводные поляризационные диаграммы для оценки направления и угла возвышения Солнца, что позволяет им определять свои GPS-координаты, зная дату и время съемки.

Однако стоит отметить, что интенсивность и частичная поляризация подводного света очень чувствительны ко многим факторам окружающей среды, помимо положения Солнца, включая атмосферные условия, качество воды и глубину [5]. Когда Солнце/Луна не видны (затуманены и т. д.), навигация на основе поляризации ограничивается мелководьем (глубиной около 15 м) [6]. Также картина небесной поляризации может быть искажена преломлением на границе раздела воздух-вода [9]. На поляризацию влияет широкий спектр факторов, включая рассеивающие и поглощающие свойства воды, длину пути света и, следовательно, глубину воды, направление обзора, поверхность раздела воздух/вода и влияние волн на нее, а также свойства света, падающего в воду, т.е. положение Солнца/Луны на небе, облачность и другие небесные условия. Каждый из этих факторов может изменить поляризацию света, уменьшая ее (например, за счет многократного рассеяния), вызывая поляризацию (например, внутреннее отражение от границы раздела вода/воздух или рэлеевское рассеяние нисходящего света) или изменяя ориентацию (угол поляризации/направление света).



Рис. 4. Тестирование подводного метода навигации на основе поляризации, соединены поляризационная СТЗ с электронным компасом и датчиком наклона, измерения на основе подводной поляризации были проведены в различных местах по всему миру, при различных глубинах, условиях ветра и временах суток [2]

Кроме того, морские организмы могут влиять и даже генерировать локальную поляризацию посредством рассеяния, отражения и двойного лучепреломления своих тканей [7].

■ Математическое описание и графическое представление параметров поляризации электромагнитных волн

Как известно, с точки зрения волновой оптики световые волны являются поперечными и имеют электромагнитную природу. Одним из свойств световых волн является поляризация, описывающая положение векторов напряженности электрического поля и магнитного поля в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Можно выделить следующие варианты степени поляризации: полностью поляризованный, частично поляризованный и неполяризованный свет. По типам поляризации чаще всего выделяют линейную и эллиптическую (с частным случаем в виде круговой) поляризации.

В естественных сценах преобладают неполяризованные световые волны с малой долей частично поляризованных волн. Существует ряд основных механизмов поляризации изначально неполяризованного света от естественных источников: частичная поляризация при прохождении атмосферы (поляризация рассеяния), частичная поляризация при отражении лучей от поверхностей под различными углами, полная поляризация при отражении лучей от поверхностей под углом Брюстера, а также поляризация при прохождении через анизотропные по оптическим свойствам материалы.

Информация о поляризованном свете содержится в четырех компонентах уравнения вектора Стокса, которое в общем виде может быть записано как (1):

$$S = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T, \quad (1)$$

где S_0 – общая интенсивность света, S_1 – доля линейной поляризации, параллельной плоскостям отсчета, S_2 – доля линейной поляризации под углами 45° и 135° по отношению к плоскостям отсчета, S_3 – доля круговой поляризации.

На основе этой формулы можно характеризовать поляризацию световой волны наглядным геометрическим способом (рис. 5).

При этом параметры вектора Стокса S_1 , S_2 и S_3 интерпретируются как декартовы координаты точки, лежащей на поверхности сферы радиуса S_0 . Углы 2ψ и 2χ имеют смысл сферических угловых координат этой точки. Такое геометрическое представление предложил А. Пуанкаре, поэтому эта сфера называется сферой Пуанкаре.

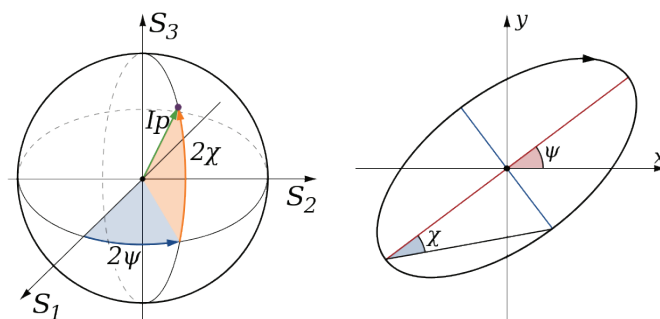


Рис. 5. Изображение поляризации параметрами Стокса на сфере Пуанкаре (а) и поляризационным эллипсом (б)

Взаимосвязь между параметрами вектора Стокса, интенсивностью и параметрами поляризационного эллипса описывается как (2):

$$\begin{cases} S_0 = I; \\ S_1 = I \cos 2\psi \cos 2\chi; \\ S_2 = I \sin 2\psi \cos 2\chi; \\ S_3 = I \sin 2\chi. \end{cases} \quad (2)$$

В оптике для анализа поляризации света чаще всего применяются линейные поляризаторы, работа которых может быть описана законом Малюса, описывающего интенсивность излучения на выходе поляризатора (3):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

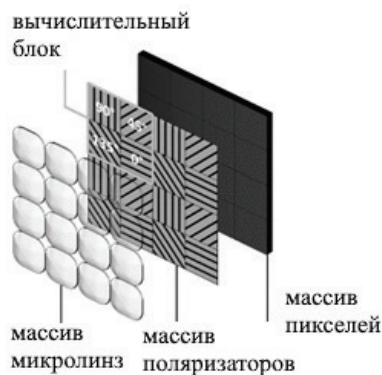
где I_0 – интенсивность падающего на поляризатор света, I – интенсивность света, выходящего из поляризатора, φ – угол между главной осью поляризатора и направлением поляризации падающего света.

Такие поляризаторы, помещаемые перед фоточувствительным элементом, позволяют по интенсивности проходящего излучения оценить степень линейной поляризации (DoLP) волны в плоскости, соответствующей главной оси поляризатора. Использование нескольких линейных поляризаторов, расположенных в одной плоскости, но под разными углами, позволяет путем вычислений рассчитать угол линейной поляризации (AoLP).

■ Описание используемой при разработке системы подводного видения технологии

Одной из коммерчески доступных перспективных технологий в данном направлении является реализация массивов линейных поляризационных фильтров из платиновых наноструктур непосредственно на КМОП-матрицах фотоэлементов. Такие специа-

лизированные поляризационные сенсоры реализованы, в частности, для инфракрасной и видимой частей спектра. Устройство поляризационного сенсора на примере технологии Sony «Polarization Image Sensor Technology Polarsens™» [9] приведено на рис. 6.



90°	45°	90°	45°
135°	0°	135°	0°
90°	45°	90°	45°
135°	0°	135°	0°

Рис. 6. Устройство поляризационного сенсора на примере технологии Sony «Polarization Image Sensor Technology Polarsens™» [9, с переводом]

На сегодняшний день Sony предлагает поляризационные сенсоры в шести видах исполнения, включая моно и цветные сенсоры с разрешением от 5,07 до 12,37 Мп. Зависимость коэффициента затухания от длины волны для матриц IMX250MZR/IMX264MZR/IMX253MZR показана на рис. 7 [10].

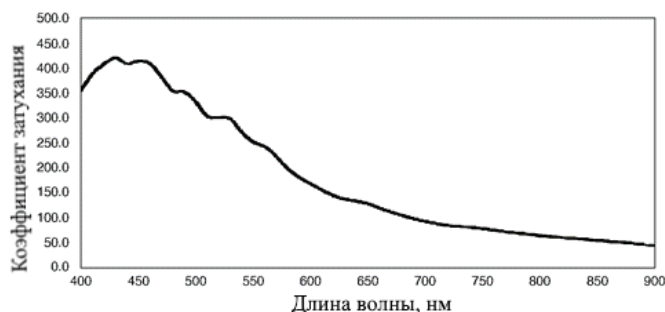


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания от длины волны для матриц IMX250MZR/IMX264MZR/IMX253MZR [10, с переводом]

Коэффициент затухания поляризационного датчика изображения — это соотношение между чувствительностью света по оси пропускания и чувствительностью света по оси затухания (чувствительность света по оси пропускания / чувствительность света по оси затухания). Чем выше число, тем лучше характеристики и производительность.

Максимум коэффициента затухания приходится на длину волны 430 нм.

Профиль пропускной способности поляризационного фильтра в зависимости от угла поляризации излучения показан на рис. 8 [10].

На рис. 8 показано, что только часть излучения под кривой отклика относительного поляризатора

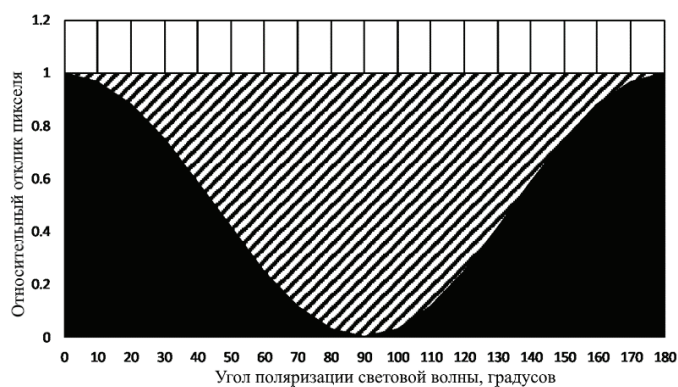


Рис. 8. Профиль пропускной способности поляризационного фильтра [10, с переводом]

попадет на датчик, что составляет 50% от общей площади.

Сама передача фильтра еще больше уменьшит отклик.

В случае с датчиком Sony IMX250MZR уменьшение отклика, вызванное фильтром, можно получить из значений квантовой эффективности, измеренных на длине волны 529 нм:

- IMX250LLR (стандартный монохромный датчик): 64%
- IMX250MZR (поляризованный монохромный датчик): 25%

Снижение из-за поляризации составляет 50%, что дает: $50\% \times 64\% = 32\%$ исходной интенсивности света (фильтр поглощает $25\% / 32\% = 78\%$).

Камеры на базе данных матриц выпускаются рядом производителей дружественных и недружественных стран, в том числе:

- Hikrobot (Китай), модель MV-CH050-10UP;
- Allied Vision (Германия), модель Mako G 508B POL;
- Sony (Япония, США), модель XCG-CP510_XPL-SDKLJ;
- The Imaging Source (Германия), модель DZK 33GX250 33G Polarsens.

■ Разработка поляризационной системы подводного видения

Поляризационная система подводного видения разработана собственными силами на основе доступных материалов и оборудования. Вначале была разработана 3D модель, показанная на рис. 9.

Далее в полипропиленовую сантехническую трубу (раструб диаметром 200 мм) были вклеены на полиуретановый клей закладные, распечатанные на 3D принтере. Дополнительно закладные были прикре-

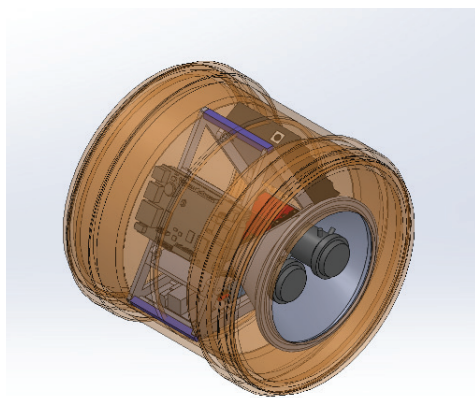


Рис. 9. 3D модель поляризационной системы подводного видения

плены к стенкам посредством крепежа 3 мм (рис. 10).

Далее была произведена установка и коммутация оборудования на раме (рис. 11).

Следует отметить, что в разработанной системе предусмотрен светопоглотитель, который после печати на 3D принтере был покрыт матовой черной краской (рис. 12).

Назначением светопоглотителя является избегание нарушения естественной поляризации световых волн из-за внутренних переотражений от поляризующих поверхностей, а также устранение бликов на внутренней поверхности защитного стекла.

В качестве оборудования установлены: камеры машинного зрения с маской Байера и поляризационной маской, два объектива с фокусным расстоянием 8 мм, сетевой коммутатор, бортовой вычислитель, схема питания оборудования. Две камеры установлены для сравнения информативности данных датчиков с поляризационными фильтрами и маской Байера с фильтрами длины/частоты волны (цветовыми фильтрами).

Далее в заднюю крышку системы был вклеен на полиуретановый клей герметичный разъем на 10 пинов, а также собрана передняя крышка. В качестве защитного материала



Рис. 10. Вклейка закладных и установка рамы в пропиленовый сантехнический раструб

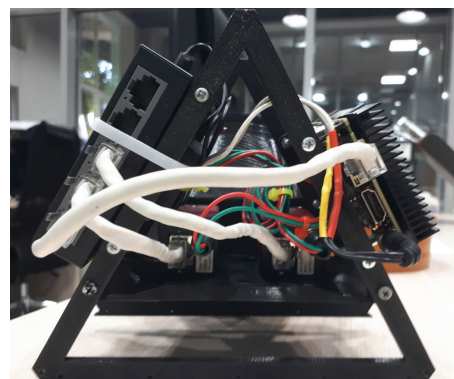
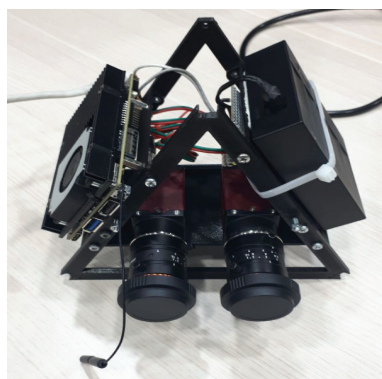
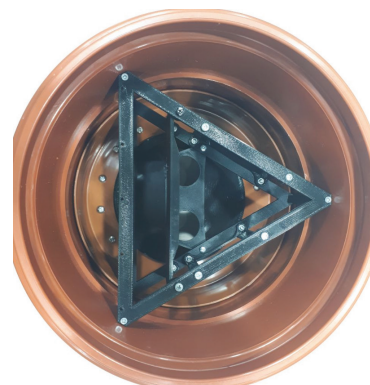


Рис. 11. Установка и коммутация оборудования на внутренней раме

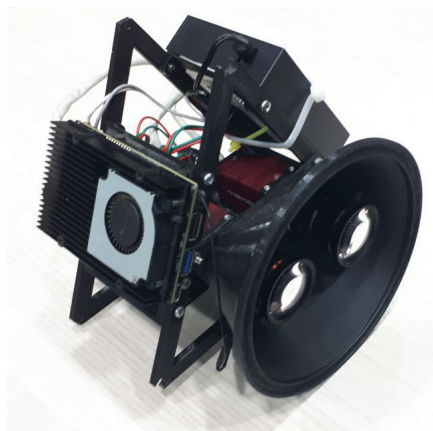


Рис. 12. Светопоглотитель системы подводного видения



Рис. 13. Общий вид собранной системы подводного видения



переднего окна был использован листовой оптически прозрачный поликарбонат 8 мм, а в качестве уплотнительной прокладки – кольцо из пищевого силикона диаметром 130 мм и толщиной 6 мм. В качестве крепежа использованы винты из нержавеющей стали с резьбой М4. Детали перед сборкой и собранная система подводного видения показаны на рис. 13.

Питание и информационный обмен совершаются через кабель типа витая пара.

■ Методика проведения эксперимента и обработки данных по поиску поляризационного паттерна

В ходе проведения эксперимента производилось погружение оператором разработанной системы на глубины от 0,5 до 1,5 м. В процессе погружения данные с камер при вращении по азимуту обрабатывались бортовым компьютером, передавались на пункт управления (ноутбук) и выводились на экран, а также записывались в ПЗУ для дальнейшего анализа.

Поиск поляризационного паттерна произведен на основе формирования изображения в пространстве HSV (англ. Hue, Saturation, Value – тон, насыщенность, значение). При этом тон определялся на основе угла линейной поляризации, насыщенность – на основе степени линейной поляризации, а интенсивность (значение) – на основе интенсивности пикселей (рис. 14).

Состояние поляризации падающего света $S = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, которое изменяется поляризационной матрицей, можно выразить на основе матрицы Мюллера (4):

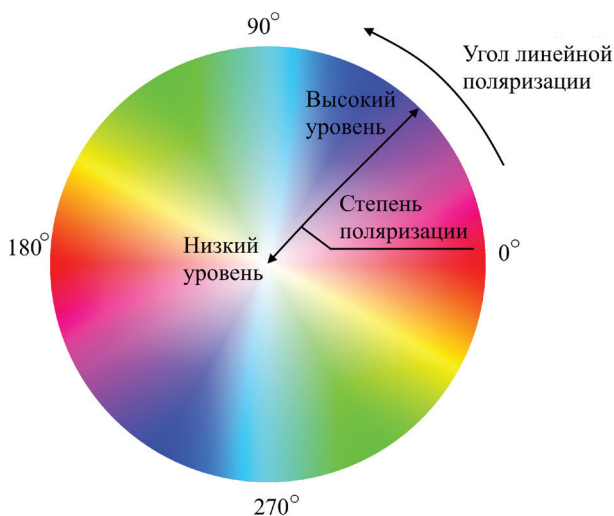


Рис. 14. Формирование изображения в пространстве HSV на основе расчетных данных о поляризации и интенсивности пикселей

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 \varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где ψ – угол между главной оптической осью и нулевой реперной линией, $S' = [S'_0, S'_1, S'_2, S'_3]^T$ – состояние поляризации выходящего света.

Здесь важна первая строка матрицы Мюллера (4), потому что интенсивность света может быть получена непосредственно камерой (5):

$$S'_0(\varphi) = \frac{1}{2} * (S_0 + S_1 * \cos 2\varphi + S_2 * \sin 2\varphi) \quad (5)$$

Следовательно, если известны интенсивности выходящего света при трех различных значениях ψ , можно вычислить значения S_0 , S_1 и S_2 падающего луча.

Обработка изображений произведена следующим способом.

На первом этапе производится сепарация полученного массива с сырыми данными по каналам поляризационных фильтров: 0, 45, 90 и 135 градусов.

Далее производится расчет нормализованных параметров вектора Стокса на основе разделения по каналам поляризации (6) [8]:

$$\begin{aligned} S_0 &= ch_0 + ch_{90}, \\ S_1 &= ch_0 - ch_{90}, \\ S_2 &= ch_{45} - ch_{135}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для рассчитанных по выражениям на первом этапе параметров вектора Стокса $S_0 - S_3$ производится проверка условий поляризованности излучения (7):

$$\begin{aligned} polariz & -1.0 \leq S_1 \leq 1.0; \\ nepolariz & -1.0 \leq S_1 \leq 1.0, \\ polariz & -1.0 \leq S_2 \leq 1.0; \\ nepolariz & -1.0 \leq S_2 \leq 1.0, \\ polariz & -1.0 \leq S_3 \leq 1.0; \\ nepolariz & -1.0 \leq S_3 \leq 1.0. \end{aligned} \quad (7)$$

Далее посредством выражения (8) производится расчет углов линейной поляризации (AoP) для каждого блока элементарных фильтров матрицы камеры машинного зрения, состоящего из 4 каналов:

$$AoP = 0.5 * \arctan 2(S_2, S_1), \quad (8)$$

Затем производится расчет степени линейной поляризации (DoP) для каждого блока элементарных фильтров матриц камеры машинного зрения (9):

$$DoP = \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right) / S_0. \quad (9)$$

Степень поляризации указывает отношение интенсивности поляризованного света к интенсивности неполяризованной части света.

Далее производится процедура формирования изображения для обнаружения поляризационного навигационного паттерна на основе HSV-представления (10–13).

$$H = \left(AoP + \frac{\pi}{2} \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right), \quad (10)$$

$$S = \left(\frac{DoP}{\max(DoP)} * 255 \right), \quad (11)$$

$$V = \left(\frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{\max(S_1^2 + S_2^2)} * 255 \right), \quad (12)$$

$$\text{Image} = \text{concat}(H, S, V). \quad (13)$$

Также для данных были сформированы изображения в псевдо RGB, что осуществлено путем объединения в одно изображение трех каналов поляризационной камеры.

Примеры данных для различных азимутов показаны на рис. 15.

■ Обсуждение результатов

Проведенные испытания показали высокую разрешающую способность разработанной системы и алгоритмов обработки изображения поляризационного видения к изменению курсового угла. Изменения в отклике системы происходят при повороте главной оптической системы по курсу на угол от 0,3 градуса (по данным использованного для верификации 3D компаса DCM260B). Это указывает на чувствительность извлеченного паттерна к небесной поляризации в

свете, проникающем под воду, что позволяет определять направление на Солнце как основной источник освещения. Таким образом, разработанная система может быть использована для расчета курсового угла АНПА в целях навигации с учетом текущей даты и времени суток.

При этом выявлена высокая чувствительность предложенного паттерна не только к курсовому углу, но и к углам наклона камеры по крену и тангажу. Это, с одной стороны, вызывает необходимость учета данных углов для расчета корректного курса по поляризационному навигационному паттерну, а с другой

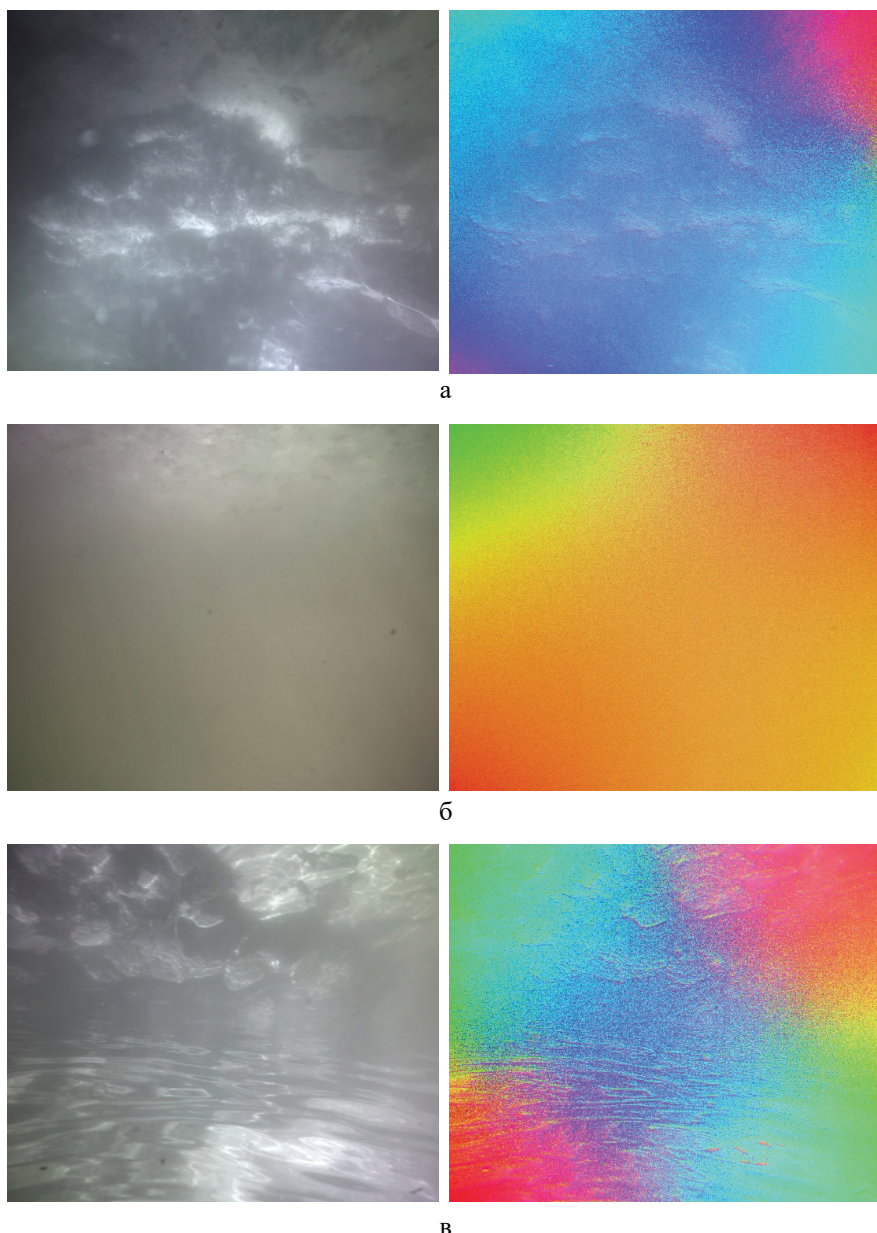


Рис. 15. Примеры обработки данных поляризационной системы подводного видения для различных азимутальных направлений в пространстве, слева – сырые данные до обработки (псевдо RGB), справа – результат обнаружения поляризационного паттерна: а – азимут 122°, б – азимут 141°, в – азимут 180°

стороны, открывает возможности по определению углов курса крена и тангажа в случае по поляризационным данным, если имеется информация об ориентации системы по курсу.

Высокую чувствительность предложенного поляризационного паттерна к различным курсовым направлениям предлагается использовать для обучения алгоритмов искусственных нейронных сетей на базе поляризационных выборок и данных об истинных углах курса, крена/тангажа, подобно подходу в работе «Polarization-based underwater geolocalization with deep learning» [8]. При этом структура данных предложенного нами поляризационного паттерна, представляющая собой матрицу $1232 \times 1023 \times 3$ (трехканальное изображение) хорошо подходит для обработки данных математическим аппаратом сверточных нейронных сетей. Комплексирование сырых данных 4-х поляризационных каналов производится путем расчета двумерных матриц, содержащих информацию об углах и степени линейной поляризации, а также интенсивности пикселей, с последующим объединением двумерных матриц в трехмерный массив.

Заключение

В статье представлена работа системы подводного видения для обнаружения поляризационного паттерна в целях осуществления навигации АНПА. Предложен метод обнаружения паттерна на основе подхода с формированием изображения в цветовом пространстве HSV на основе рассчитанных для кадра данных о степени линейной поляризации, углах линейной поляризации и интенсивности пикселей. Проведен эксперимент и показаны результаты обработки данных при различных азимутальных направлениях камеры под водой. Результаты показывают высокую чувствительность разработанной аппаратуры и предложенного метода формирования поляризационного паттерна к изменению курсового угла ориентации системы. Предложенный метод позволяет в одном массиве данных (изображении с тремя каналами) комплексировать данные о степени, угле линейной поляризации и интенсивности пикселей, что является перспективным вариантом для дальнейшего анализа данных алгоритмами сверточных искусственных нейронных сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lerner A., Sabbah S., Erlick C., Shashar N. Navigation by light polarization in clear and turbid waters // *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 2011. B. 366. P. 671–679.
2. Powell S.b., Garnett R., Marshall J., Rizkand C., Gruev V. Bioinspired polarization vision enables underwater geolocalization // *Science advances*. 2018. Vol. 4, Issue 4. DOI: 10.1126/sciadv.aao6841
3. Goddard S.M., Forward R.B. The role of underwater polarized light pattern in sun compass navigation of the grass shrimp, *Palaemonetes vulgaris* // *J. Comp. Physiol.* 1991. A 169, 479–491. DOI: 10.1007/BF00197660 (doi:10.1007/BF00197660)
4. Ivanoff A., Waterman T.H. Factors, mainly depth and wavelength, affecting the degree of underwater light polarization // *J. Mar. Res.* 1958. 16, 283–307.
5. Shashar N., Johnsen S., Lerner A., Sabbah S., Chiao C.-C., Mäthger L.M., Hanlon R.T. Underwater linear polarization: physical limitations to biological functions // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2011. 366(1565): 649–654. doi: 10.1098/rstb.2010.0190
6. Waterman T.H. Polarization of scattered sunlight in deep water // *Deep-Sea Res.* 1955. 3(suppl.). P. 426–434.
7. York S.B. Powell S.G., Kahan L., Charanya T., Saha D., Roberts N.W., Cronin T.W., Marshall J., Achilefu S., Lake S.P., Raman B., Gruev V. Bioinspired polarization imaging sensors: from circuits and optics to signal processing algorithms and biomedical applications // *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102. P. 1450–1469.
8. Bai X., Liang Z., Zhu Z., Schwing A., Forsyth D., Gruev V. Polarization-based underwater geolocalization with deep learning. 2023. eLight 3, No. 15. URL: <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00050-6>
9. <https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/polarsens.html>
10. https://www.sony-semicon.com/files/62/flyer_industry/IMX250_264_253MZR_MYR_Flyer_en.pdf

Для цитирования:

Будко Н.А., Пивнев В.В., Будко А.Ю., Караев А.Д., Стаценко А.И., Кабачевский Я.В. РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ И МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПАТТЕРНА ДЛЯ НАВИГАЦИИ АНПА // *Подводные исследования и робототехника*. 2024. №. 4 (50). С. 28–39. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_04. EDN: MUAVPW.

Справка об авторах

БУДКО Наталья Александровна, инженер
Южный федеральный университет
Адрес места работы: г. Таганрог, Россия
Область научных интересов: системы подводного видения, интерфейсы человек-машина, нейронные сети, машинное обучение
E-mail: tyumenceva@sfedu.ru

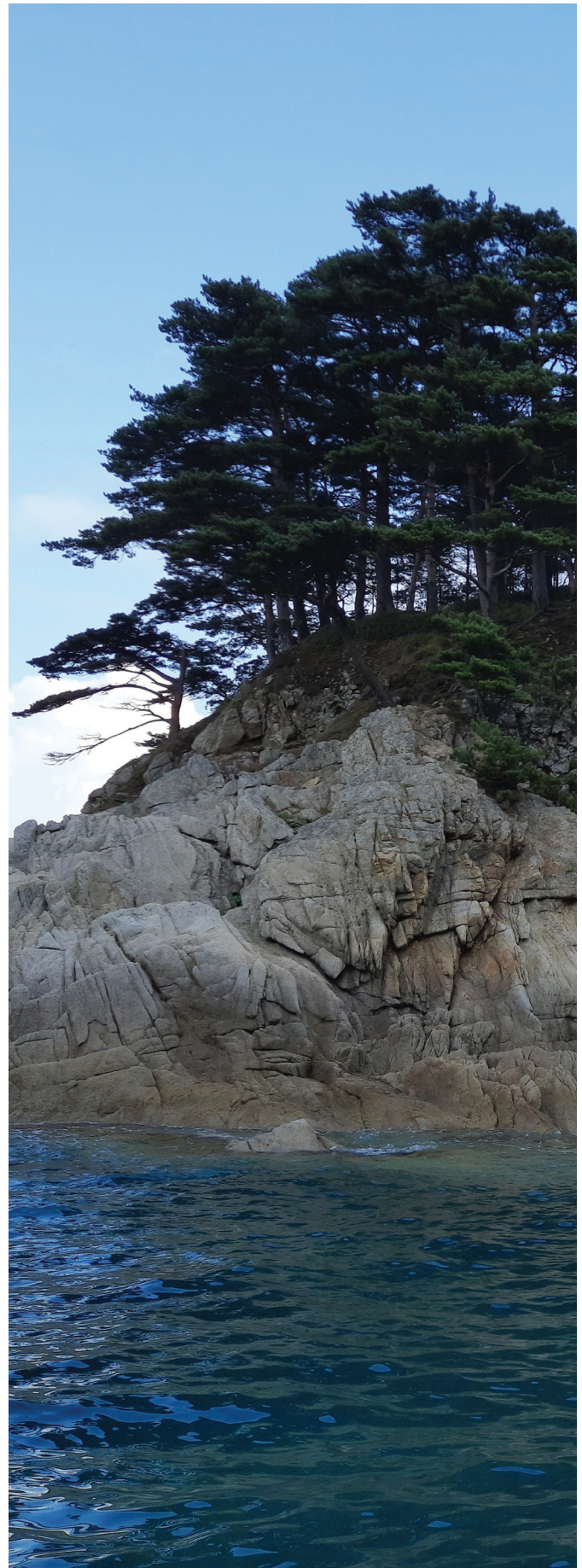
ПИВНЕВ Виталий Викторович, к. т. н., с. н. с.
Южный федеральный университет
Адрес места работы: г. Таганрог, Россия
Область научных интересов: электротехника, электроэнергетика, робототехника, математическое моделирование, информационные технологии, программирование
E-mail: pivnev@sfedu.ru
ORCID: 0000-0002-9713-7390

БУДКО Артем Юрьевич, к. т. н., с. н. с.
Южный федеральный университет
Адрес места работы: г. Таганрог, Россия
Область научных интересов: системный анализ, управление, обработка информации
E-mail: abudko@sfedu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0228-2139>

КАРАЕВ Артём Дмитриевич, бакалавр, инженер-исследователь
Южный федеральный университет
Адрес места работы: Таганрог, Россия
Область научных интересов: компьютерное зрение
E-mail: karaev@sfedu.ru

СТАЦЕНКО Андрей Иванович, инженер-исследователь
Южный федеральный университет
Адрес места работы: г. Таганрог, Россия
Область научных интересов: Встраиваемые системы
E-mail: anstacenko@sfedu.ru
ORCID: 0000-0001-8588-2644

КАБАЧЕВСКИЙ Ярослав Валерьевич, техник-проектировщик
Южный федеральный университет
Адрес места работы: г. Таганрог, Российская Федерация
Область научных интересов: 3Д моделирование, робототехника
E-mail: yaroslavkabachevsky@yandex.ru



DEVELOPMENT OF A POLARIZED UNDERWATER VISION SYSTEM AND A METHOD FOR IDENTIFYING A NAVIGATION POLARIZATION PATTERN FOR AUV NAVIGATION

N.A. Budko, V.V. Pivnev, A.Yu. Budko, A.D. Karaev, A.I. Statsenko, Ya.V. Kabachevsky

Recently, AUVs have become increasingly widespread in various fields of human activity. This topic is most relevant for conducting research in the deep sea, as well as in the field of monitoring the condition and ensuring the safety of underwater communications. At the same time, AUV navigation is a complex task, which makes new methods of its implementation relevant. This paper discusses general issues of underwater navigation based on the polarization pattern. Based on reviews of authoritative sources, the possibility of navigation is shown based on an analysis of the polarization of sunlight passing under water and knowledge of the exact world time and date. The following shows the development of our own underwater vision system based on polarization and color cameras. At the end of the work, the result of testing the developed underwater vision system for obtaining underwater images and analyzing polarization pattern data for the purpose of AUV navigation is presented. When processing data in order to detect a navigation polarization pattern, a procedure for forming an image in the HSV color space is proposed based on data calculated for the frame on the degree of linear polarization, angles of linear polarization and pixel intensity. In general, it was concluded that the developed underwater vision system makes it possible to record significant data on the polarization of underwater light for the purposes of AUV navigation.

Keywords: AUV, navigation, polarization of light waves, underwater vision systems

References

1. Lerner A., Sabbah S., Erlick C., Shashar N. Navigation by light polarization in clear and turbid waters. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 2011. B. 366. P. 671–679.
2. Powell S.B., Garnett R., Marshall J., Rizkand C., Gruev V. Bio-inspired polarization vision enables underwater geolocalization. *Science advances*. 2018. Vol. 4, Issue 4. DOI: 10.1126/sciadv.aao6841
3. Goddard S.M., Forward R.B. The role of underwater polarized light pattern in sun compass navigation of the grass shrimp, *Palaemonetes vulgaris*. *J. Comp. Physiol.* 1991. A 169, 479–491. DOI: 10.1007/BF00197660 (doi: 10.1007/BF00197660)
4. Ivanoff A., Waterman T.H. Factors, mainly depth and wavelength, affecting the degree of underwater light polarization. *J. Mar. Res.* 1958. 16, 283–307.
5. Shashar N., Johnsen S., Lerner A., Sabbah S., Chiao C.-C., Mäthger L.M., Hanlon R.T. Underwater linear polarization: physical limitations to biological functions. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2011. 366(1565): 649–654. doi: 10.1098/rstb.2010.0190
6. Waterman T.H. Polarization of scattered sunlight in deep water. *Deep-Sea Res.* 1955. 3(suppl.). P. 426–434.
7. York S.B., Powell S.G., Kahan L., Charanya T., Saha D., Roberts N.W., Cronin T.W., Marshall J., Achilefu S., Lake S.P., Raman B., Gruev V. Bioinspired polarization imaging sensors: from circuits and optics to signal processing algorithms and biomedical applications. *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102. P. 1450–1469.
8. Bai X., Liang Z., Zhu Z., Schwing A., Forsyth D., Gruev V. Polarization-based underwater geolocalization with deep learning. 2023. *eLight* 3, No. 15. URL: <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00050-6>
9. <https://www.sony-semicon.com/en/technology/industry/polarsens.html>
10. https://www.sony-semicon.com/files/62/flyer_industry/IMX250_264_253MZR_MYR_Flyer_en.pdf

Recommended citation:

Budko N.A., Pivnev V.V., Budko A.Yu., Karaev A.D., Statsenko A.I., Kabachevsky Ya.V. DEVELOPMENT OF A POLARIZED UNDERWATER VISION SYSTEM AND A METHOD FOR IDENTIFYING A NAVIGATION POLARIZATION PATTERN FOR AUV NAVIGATION. *Underwater investigations and robotics*. 2024. No. 4 (50). P. 28–39. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_04. EDN: MUAVPW.

Information about the authors

BUDKO Natalya Aleksandrovna

Place of work: Southern Federal University

Work address: Taganrog, Russia

Research interests: underwater vision systems, human-machine interfaces, neural networks, machine learning

E-mail: tyumenceva@sfedu.ru

PIVNEV Vitaly Viktorovich, Ph.D. of Engineering Sciences

Place of work: Southern Federal University, Senior Researcher

Work address: Taganrog, Russia

Research interests: Electrical engineering, electric power engineering, robotics, mathematical modeling, information technology, programming

E-mail: pivnev@sfedu.ru. **ORCID:** 0000-0002-9713-7390

BUDKO Artem Yurievich, Ph.D., Senior Researcher

Place of work: Southern Federal University

Work address: Taganrog, Russia

Research interests: system analysis, management, information processing

E-mail: abudko@sfedu.ru. **ORCID:** 0000-0003-0228-2139

KARAEV Artyom D.

Work address: Taganrog, Russia

Research Interests: Computer vision

E-mail: karaev@sfedu.ru

STATSENKO Andrey Ivanovich, Research Engineer

Place of work: Southern Federal University

Work address: Taganrog, Russia

Research Interests: Embedded systems

E-mail: anstacenko@sfedu.ru

ORCID 0000-0001-8588-2644

KABACHEVSKY Yaroslav Valerievich

Place of work: Southern Federal University

Work address: Taganrog, Russian Federation

Research Interests: 3D modeling, robotics

E-mail: yaroslavkabachevsky@yandex.ru

