

**Кравченко Даниил Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: kravchenkodanil122@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; студент.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Кулиев Эльмар Валерьевич** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Саак Андрей Эрнестович** – e-mail: aesaak@sfedu.ru; тел.: 88634393373; кафедра государственного и муниципального управления; зав. кафедрой.

**Kravchenko Daniil Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: kravchenkodanil122@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; student.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

**Kuliev Elmar Valerievich** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; the department of computer aided design; associate professor.

**Saak Andrey Ernestovich** – e-mail: aesaak@sfedu.ru; phone: +78634393-373; the department of state and municipal management, head of department.

УДК 621.397.13:629.584

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-158-170

**Н.А. Будко, А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев**

## **ВЫЧИТАНИЕ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В МУТНОЙ ВОДЕ**

*Исследование морских глубин в целях обеспечения безопасности, эффективного использования подводных ресурсов является актуальной задачей. В первой части статьи кратко рассмотрены физические феномены и ограничения, возникающие при распространении электромагнитных волн видимого диапазона в подводной среде. Показано, что системы подводного видения (как класс специализированных систем технического зрения, - СТЗ) на основе обычных ПЗС матриц сталкиваются с рядом фундаментальных ограничений в вопросе повышения эффективности функционирования в природной воде низкой прозрачности. В частности, использование искусственных источников освещения в составе систем подводного видения в мутной воде приводит к возникновению помехи обратного распространения (ПОР), приводящей к паразитной засветке матрицы оптического прибора. В качестве перспективного направления развития систем подводного видения предлагается использовать методы вычитания ПОР на основе информации о поляризации света. В обзорной части статьи рассмотрены последние достижения в данной области. В основной части статьи представлена методология исследования предлагаемого метода вычитания ПОР на основе сравнения с результатами, получаемыми при обработке изображений известными методами оценки параметров вектора Стокса DoLP и AoLP, позволяющими получать информацию о степени поляризации и преобладающих углах поляризации света соответственно. Представлены экспериментально полученные результаты обработки данных съемок подводной сцены в воде различной степени мутности посредством алгоритмов DoLP, AoLP и предлагаемым методом вычитания ПОР. Отличительными особенностями является использование при расчетах четырех, а не двух направлений поляризации, а также оригинальный математический аппарат обработки сигналов матрицы камеры машинного зрения.*

*Системы технического зрения; поляризация света; степень линейной поляризации; угол линейной поляризации; помеха обратного распространения.*

N.A. Budko, A.Yu. Budko, M.Yu. Medvedev

**SUBTRACTION OF BACKPROPAGATION INTERFERENCE BASED  
ON POLARIZATION IN UNDERWATER VISION SYSTEMS  
FOR OPERATION IN TURBID WATER**

*The study of the sea depths in order to ensure safety, the effective use of underwater resources is an urgent task. The first part of the article briefly considers the physical phenomena and limitations that arise during the propagation of electromagnetic waves in the visible range in the underwater environment. It is shown that underwater vision systems (as a class of specialized technical vision systems - TVS) based on conventional CCD matrices face a number of fundamental limitations in terms of improving the efficiency of functioning in natural water of low transparency. In particular, the use of artificial light sources as part of underwater vision systems in turbid water leads to the occurrence of backpropagation interference (BPR), which leads to spurious illumination of the optical device matrix. As a promising direction in the development of underwater vision systems, it is proposed to use methods for subtracting POR based on information about the polarization of light. In the review part of the article, the latest achievements in this field are considered. The main part of the article presents the methodology for studying the proposed method for subtracting the POR based on a comparison of the results obtained by processing images with known methods for estimating the Stokes vector parameters DoLP and AoLP, which allow obtaining information about the degree of polarization and the prevailing polarization angles of the scene, respectively. The experimentally obtained results of processing an underwater scene in water of varying degrees of turbidity using the DoLP, AoLP algorithms and the proposed methods for subtracting the POR are presented. Distinctive features are the use of four rather than two polarization directions in calculations, as well as the original mathematical apparatus for processing signals from the machine vision camera matrix.*

*Technical vision system; polarization of light; degree of linear polarization; angle of linear polarization; backpropagation interference.*

**Введение.** Разработка систем подводного видения является на сегодняшний день актуальной задачей в силу возрастающего интереса к исследованию и освоению подводных пространств [1]. Информационные каналы, построенные на основе визуальных данных, позволяют получать объективные данные о подводной обстановке на различных глубинах погружения. При этом, спектр задач, решаемых системами подводного видения, включает следующие направления: научные исследования, народнохозяйственное и оборонное применения, выполнение поисковых и аварийно-спасательных операций (в т.ч. поиск утопающих) и т.д. [2–5]. В частности, могут быть выделены следующие задачи: осуществление локальной и глобальной навигации; обнаружение препятствий; обнаружение доковых станций и сопровождение процесса стыковки; геодезическая съемка рельефа морского дна; геологическая разведка на шельфе и в глубоководных районах Мирового океана; осмотр и обследование подводных конструкций и коммуникаций, установок нефте- и газодобывающего комплекса, нефтепроводов и газопроводов, кабельных трасс и т.п.

**Проблемы подводного видения и постановка задачи.** В качестве основных физических ограничений, обусловленных особенностями распространения световых волн ближнего инфракрасного и видимого диапазонов в природной водной среде, можно выделить следующие факторы:

- ♦ высокая плотность среды, обуславливающая сильное ослабление интенсивности световых волн (в 1000 раз и более по сравнению с воздухом в зависимости от условий) и ограничивающая максимальную дальность прямой видимости десятками метров;

- ◆ низкая естественная освещенность (в большинстве случаев), приводящая к необходимости использования дополнительных искусственных источников освещения;
- ◆ динамичная относительная прозрачность среды, обуславливающая высокое поглощение световых волн и изменение дальности прямой видимости в широком диапазоне;
- ◆ наличие в воде взвесей, обуславливающих повышенное рассеяние световых волн и помеху обратного рассеяния (ПОР) при использовании осветительных приборов в активных подводных СТЗ;
- ◆ эффекты рефракции световых волн, светопоглощение и светорассеяние.

Ослабление светового потока обусловлено двумя основными причинами: поглощением и рассеянием. Наибольшие затруднения при работе подводных СТЗ вызываются рассеянием. Рассеяние света в воде вызывается как присутствием в воде механических частиц, так и перемещениями молекул самой воды, но в мутной воде в большей степени зависит именно от загрязненности взвешенными частицами.

На практике прозрачность воды оценивают по глубине видимости белого диска диаметром 300 мм. Глубина видимости  $Z_D$  диска определяется как сумма результатов двух измерений (глубины исчезновения диска при погружении и глубины появления диска при его подъеме) деленная пополам.

В мутной воде и на больших глубинах используются активные системы подводного видения с прожекторами в своем составе [6]. Для нормального подводного видения важно соотношение количеств рассеянного и направленного света, поскольку существенная доля потока излучения рассеивается в заднюю полусферу относительно направления распространения. Рассеянный свет не может участвовать в образовании изображения, напротив, попадая через объектив на матрицу он вызывает ее паразитную засветку. При этом повышение силы источника света незначительно увеличивает дальность видимости, поскольку повышение мощности светового пучка приводит к увеличению ПОР, снижающей контрастность изображения. Кроме того, повышение силы света светильника в 10 раз увеличивает дальность видимости всего на 15%. Таким образом, возникающая в канале распространения ПОР создает значительные сложности при приеме слабого отраженного сигнала.

Наиболее простым способом борьбы с ПОР является разнесение излучателей световой энергии (прожекторов) и приемников [7, 8]. Однако из-за малых размеров подводных аппаратов данный способ недостаточно эффективен. При использовании прожекторной подсветки оператор способен рассмотреть объект подойдя к нему на расстояние не менее  $0,7 \cdot Z_D$ , а эффективный поиск целей на дальностях, превышающих порог  $0,7 Z_D$  практически невозможен.

Таким образом, можно констатировать, что подводный видеосюжет представляет собой дифференциальный (разностный) сигнал – разность мощностей (энергий) оптического излучения, отраженного объектом интереса и фоном (ПОР). Чем меньше ПОР, тем более контрастным будет изображение подводных объектов, а, следовательно, и дальность их визуального наблюдения.

В связи с вышеописанными проблемами подводного видения можно выделить следующие перспективные направления развития таких систем:

- ◆ стробирующие лазерные телевизионные системы, позволяющие производить разделение сигналов ПОР и отраженного от объекта света во временной области;
- ◆ системы подводного видения с на основе поляризационных эффектов.

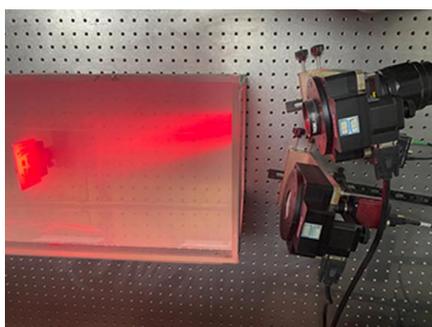
Целью данной работы является развитие методов на основе поляризационных эффектов для осуществления сепарации сигнала с матрицы фотоприемника от помехи обратного распространения, приводящее в конечном итоге к увеличению контрастности и дальности подводного видения.

**Аналитический обзор.** Свет, как и любое электромагнитное излучение, обладает четырьмя внутренними свойствами: интенсивностью, частотой, когерентностью и поляризацией. Информация о поляризации световых сигналов ранее получала сравнительно мало внимания со стороны научного сообщества и поэтому не использовалась в полной мере. В естественном мире поляризаторы есть повсюду, включая растительный и животный мир, твердые и жидкие поверхности, и прочее. Следовательно, состояние поляризации отраженного или проходящего света обычно включает в себя информацию о физическом состоянии объектов, с которыми он взаимодействовал, и, таким образом, потенциально может использоваться в анализе данных подводных съемок. Из-за ограниченного (до недавнего времени) количества поляриметрических датчиков и сложности проведения поляриметрических измерений, в настоящее время оптическое зондирование подводной среды в основном использует информацию об интенсивности, игнорируя поляриметрическую информацию. Тем не менее, как показывает ряд последних исследований, информация об оптической поляризации является полезной для решения многих проблем подводной съемки и в перспективе может помочь в достижении качественных прорывов в области подводного видения.

В качестве носителя информации, характеристики поляризованного света, такие как степень поляризации DoLP (degree of linear polarization, – степень линейной поляризации) и угол поляризации AoLP (angle of linear polarization – угол линейной поляризации), обладают большей надежностью, чем интенсивность света [9]. Более 70 подводных представителей животного мира [10] чувствительны к поляризации, а некоторые обладают способностью ориентироваться, охотиться, маскироваться и общаться с помощью поляризованного зрения [11–13].

Было обнаружено, что поляризация увеличивает контраст и дальность обнаружения в рассеивающих средах как над водой, так и под водой [14, 15], а технология бионической поляризационной навигации имеет потенциал для применения в воде [16].

В работе 2021 года исследователи разработали алгоритм, который автоматически находит оптимальные параметры для подавления рассеянного света [17]. Для испытаний в реальных условиях, исследователи создали простую установку для получения подводных изображений, используя светоизлучающий диод с длиной волны 625 нм в качестве источника света и пропуская свет через горизонтально-плоскостной поляризатор, рис. 1.



*Рис. 1. Лабораторная установка для исследования поляризованного изображения [17]*

Плоско поляризованный свет попадал в прозрачный резервуар, содержащий объект изображения, погруженный в воду, с различным количеством молока, растворенного в воде для достижения различной степени мутности. Отраженный и

рассеянный свет от каждого эксперимента проходил обратно из резервуара и проходил через анализатор состояния поляризации, позволяя захватывать горизонтально и вертикально поляризованные изображения сцены с помощью камеры CCD, полученные изображения представлены на рис. 2.

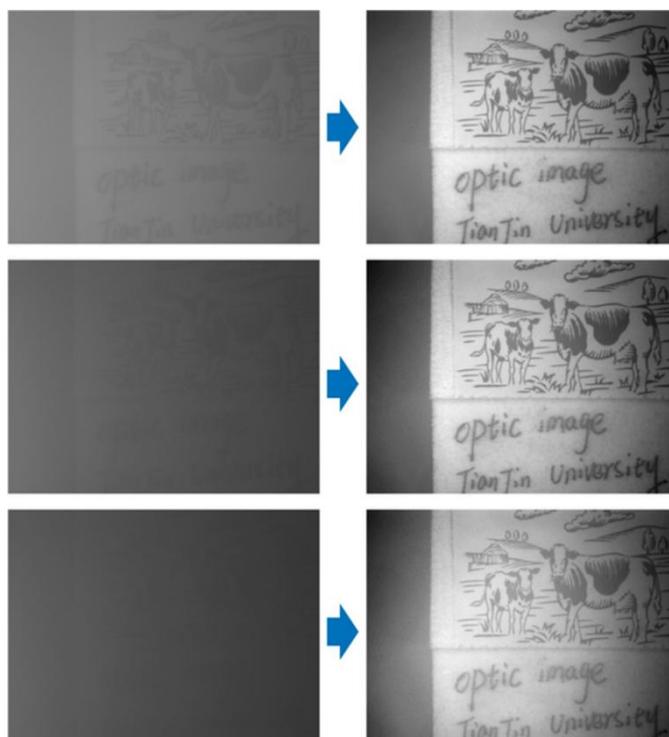


Рис. 2. Исходные изображения и результаты дифференцирования помехи обратного рассеяния [17]

В исследовании 2019 года авторами предложена модель подводной поляризационной визуализации, которая учитывает эффекты рассеяния и поглощения света в воде при естественном освещении [18]. Авторы исследовали информацию о поляризации целевой сцены, предполагая, что отраженный свет частично поляризован, а целевой свет неполяризован. Используется два поляризационных изображения целевой сцены в двух ортогональных состояниях поляризации. Отмечено, что целевой свет и обратно рассеянный свет различаются по поляризационному поведению. В частности, рассеянный свет частично поляризован, а отраженный целевой свет неполяризован из-за процесса деполяризации. Рассеяние света в работе оценивается по разности поляризации. А потеря энергии, вызванная поглощением, компенсируется за счет изучения информации о расстоянии целевой сцены (карты глубины), полученной из поляризационных изображений на основе модели Ламберта.

В работе [19] рассмотрена работа подводной СТЗ при пассивном (естественном) освещении, исходящем от солнечного света или облачного неба. Основа предложенного метода улучшения видимости заключается в том, что однократное рассеяние на мелких частицах вносит значительную поляризацию в свет при углах рассеяния около 90 градусов: этот свет затем можно отличить от света, рассеянного объектом, который остается почти полностью неполяризованным.

В исследовании 2021 года, рассмотрены вопросы улучшения видимости подводных изображений на основе технологии активного поляризованного освещения и фильтрации по математическому ожиданию [20]. Предложенный метод может напрямую удалить часть обратного рассеяния с помощью технологии поляризации, а затем решить проблему устранения дымки изображения с помощью алгоритма обработки изображений. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

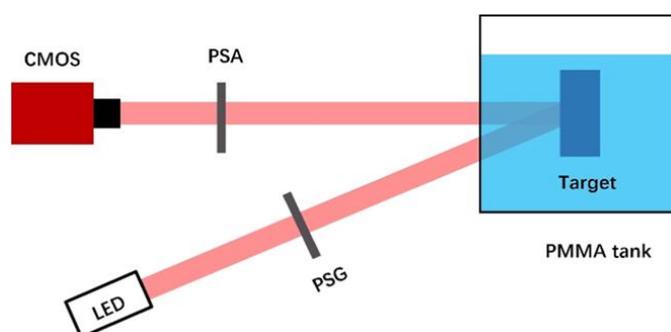


Рис. 3. Схема лабораторного стенда [20]

На рис. 3 источник света из белых светодиодов освещает цель. Система формирования изображения представляет собой 12-битный цифровой CMOS-датчик (MC023CG-SY-FL) с разрешением  $1936 \times 1216$  пикселей. Поляризаторы помещаются перед источником света и CMOS матрицей соответственно. В процессе эксперимента использовалась прозрачная емкость, наполненная водой, смешанной с обезжиренным молоком, чтобы вода стала мутной.

На рис. 4 представлены результаты обработки с использованием физического поляризатора и последующей цифровой обработки.

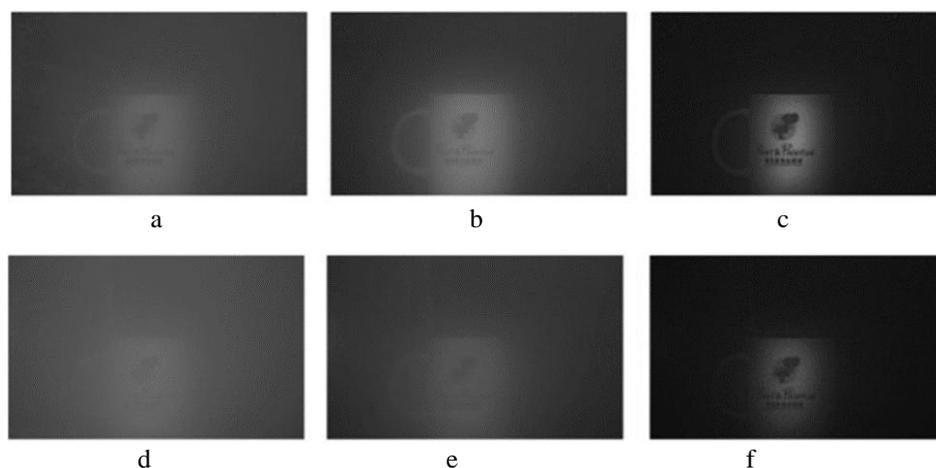


Рис. 4. Изображение стакана в оттенках серого, где верхний ряд представляет собой изображение, полученное в условиях низкой мутности, а нижний ряд — изображение, полученное в условиях высокой мутности: a и d — изображения, полученные непосредственно без поляризатора; b и e — изображения, полученные в поперечно-перпендикулярном состоянии поляризатора; c и f — изображения, полученные в перекрестно-перпендикулярное состояние поляризатора, а затем восстановленные цифровым методом удаления дымки [20]

Таким образом, методы поляризационной съемки позволяют улучшить качество изображения и характеристики СТЗ путем предоставления дополнительной информации о поляризации световых волн.

**Методология.** Исследование основано на сравнении предлагаемого метода вычитания ПОР с результатами стандартных методов оценки параметров вектора Стокса: DoLP и AoLP. DoLP – это отношение поляризованной составляющей света к общей величине света, которое может варьироваться от 0 (полностью неполяризованный свет) до 100% (полностью поляризованный свет), AoLP несет информацию об угле поляризации.

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

$$S = [I, Q, U, V]^T, \quad (1)$$

где  $I$  – общая интенсивность света,  $Q$  – доля линейной поляризации, параллельной плоскости отсчета,  $U$  – доля линейной поляризации под углом  $45^\circ$  по отношению к плоскости отсчета,  $V$  – доля правой круговой поляризации.

Состояние поляризации падающего света  $S = [I, Q, U, V]^T$ , которое изменяется поляризационной матрицей, можно выразить на основе матрицы Мюллера (2):

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 \varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол между главной оптической осью и нулевой реперной линией,  $S' = [I', Q', U', V']^T$  – состояние поляризации выходящего света.

Здесь важна первая строка матрицы Мюллера (2), потому что интенсивность света может быть получена непосредственно камерой:

$$I'(\varphi) = 1/2 * (I + Q * \cos 2\varphi + U * \sin 2\varphi). \quad (3)$$

Следовательно, если известны интенсивности выходящего света при трех различных значениях  $\varphi$ , можно вычислить значения  $I$ ,  $Q$  и  $U$  падающего луча.

Обработка изображений произведена следующим способом.

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

Далее производится расчет параметров вектора Стокса (1) на основе разделения по каналам поляризации (4):

$$\begin{aligned} S_0 &= ch_0 + ch_{90} \\ S_1 &= ch_0 - ch_{90} \\ S_2 &= ch_{45} - ch_{135} \end{aligned} \quad (4)$$

Для рассчитанных по выражениям на первом этапе параметров вектора Стокса  $S_0 - S_2$  производится проверка условий поляризованности излучения (5):

$$\begin{aligned} polariz \quad 0.0 \leq S_0 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad 0.0 \leq S_0 \leq 2.0 \\ polariz \quad -1.0 \leq S_1 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad -1.0 \leq S_1 \leq 1.0 \\ polariz \quad -1.0 \leq S_2 \leq 1.0; \quad nepolariz \quad -1.0 \leq S_2 \leq 1.0. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее посредством выражения (6) производится расчет углов линейной поляризации (AoLP) для каждого блока элементарных фильтров матрицы камеры машинного зрения, состоящего из 4 каналов:

$$AoLP = 0.5 * \text{arctan2}(S_2, S_1). \quad (6)$$

Затем производится расчет степени линейной поляризации (*DoLP*) для каждого блока элементарных фильтров матрицы камеры машинного зрения (7):

$$DoLP = \left( \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right) / S_0. \quad (7)$$

Для вычета ПОР производится обработка изображений по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} reflect_1 &= \min(ch_{90}, ch_{45}) \\ reflect_2 &= \min(ch_0, ch_{135}) \\ reflect &= \min(reflect_1, reflect_2) \\ ch_{90_{anmin}} &= ch_{90} - reflect \\ ch_{45_{anmin}} &= ch_{45} - reflect \\ ch_{135_{anmin}} &= ch_{135} - reflect \\ ch_{0_{anmin}} &= ch_0 - reflect \\ result &= ch_{90_{anmin}} + ch_{45_{anmin}} + ch_{135_{anmin}} + ch_{0_{anmin}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее была произведена сравнительная оценка описанных выше алгоритмов обработки сигнала на основе лабораторного исследования.

**Эксперимент.** Макет поляризационной СТЗ построен на основе: камеры машинного зрения Mako G-508B POL с поляризационной маской; камеры Mako G-507C с RGB маской Байера для получения контрольных снимков; вычислителя Jetson NX NVIDIA. Поляризационная камера Mako G-508B POL оснащена 5,0-мегапиксельным CMOS-датчиком Sony Polarsens™ IMX250MZR, в котором используется технология четырехстороннего поляризационного фильтра, рис. 5. Поляризационный слой нанопроволоки на кристалле поддерживает четыре ориентации поляризационных фильтров (90°, 45°, 135° и 0°).

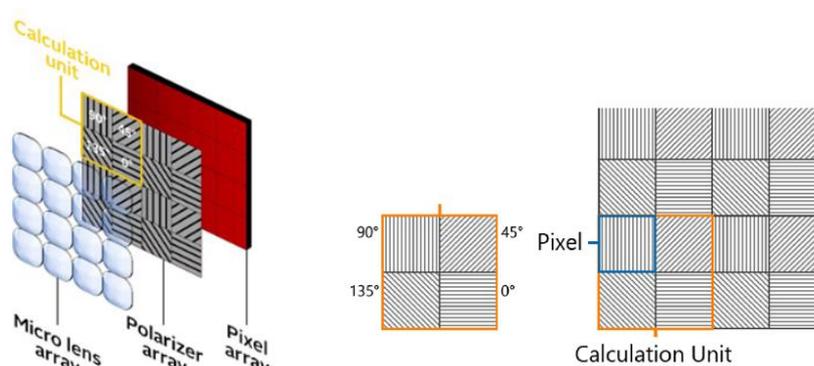


Рис. 5. Устройство матрицы Sony Polarsens™ IMX250MZR со встроенными поляризационными фильтрами

Четыре пикселя вместе составляют вычислительный блок для определения для каждого пикселя итогового изображения интенсивности и угла поляризации, аналогично RGB маске Байера. Датчик позволяет получать информацию о поляризации без дополнительных внешних фильтров.

В качестве объектива использован широкоугольный объектив Kowa LM16FC24M для матриц формата 1,1 дюйма, с максимальным диафрагменным числом 1,8 и фокусным расстоянием 16 мм.

Внешний вид макета СТЗ показан на рис. 6.

Вода объемом 47 литров была залита в емкость объемом 50 литров из стекла толщиной 4 мм. Прозрачность воды варьировалась от оптически чистой до прозрачности  $Z_D=0.12$  метра посредством добавления пищевого красителя. Емкость с водой показана на рис. 7.



Рис. 6. Внешний вид разработанного макета СТЗ

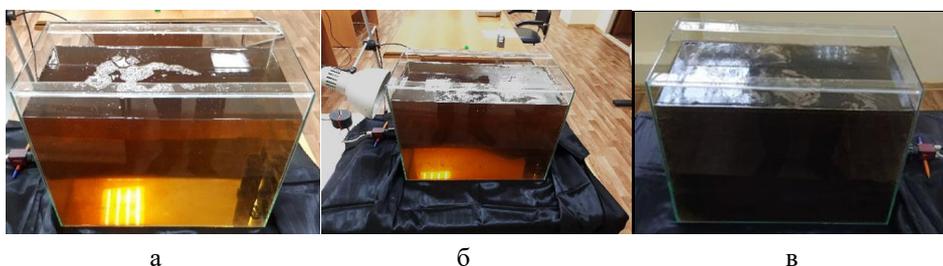
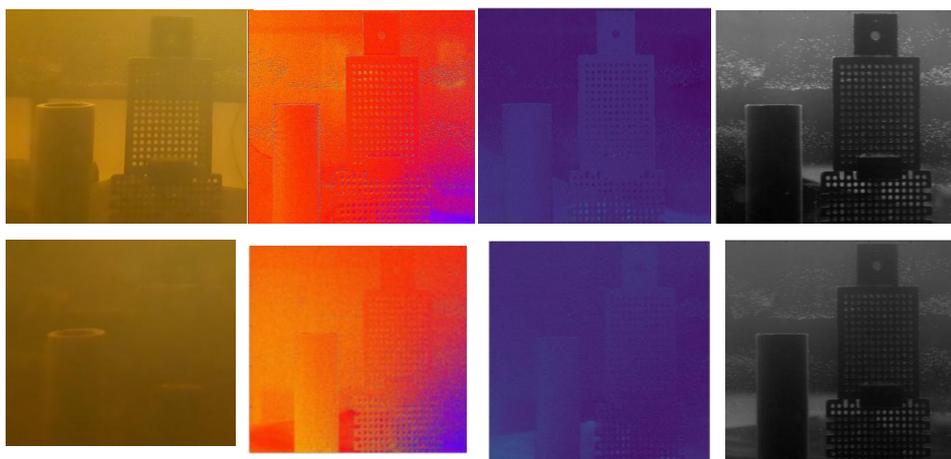


Рис. 7. Емкость с водой для моделирования мутной воды: а – прозрачность №1, б – прозрачность №2, в – прозрачность №5 ( $Z_D=0,12$  м)

Далее объекты съемки были помещены в емкость с водой на максимальное удаление от камеры машинного зрения (0,48 м). Для каждой степени прозрачности произведен сбор данных в виде сырых (RAW) кадров с камеры машинного зрения. Результаты обработки данных для съемки подводных объектов показаны на рис.8., все изображения кроме контрольной группы (рис. 8,а) получены посредством обработки данных с камеры Мако G-508B POL с поляризационной маской.



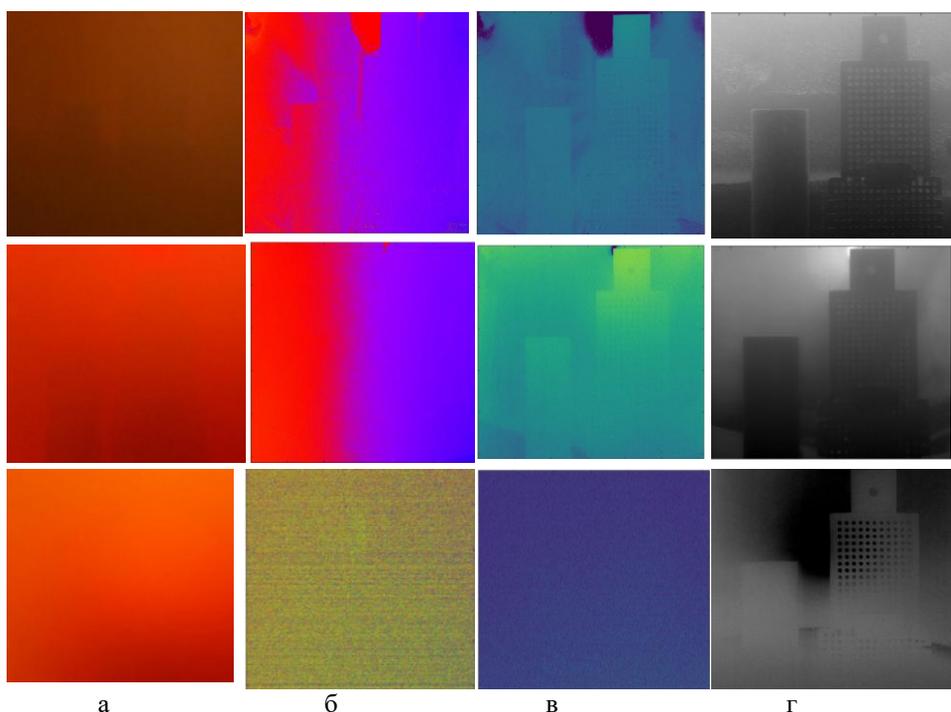


Рис. 8. Результаты обработки результатов съемки подводных объектов при пяти различных степенях прозрачности воды: а – контрольная съемка без обработки (камера Mako G-507C), б – степень поляризации DoLP, в – угол поляризации AoLP, г – изображения после вычета ПОР

**Заключение.** Анализ рис. 8 указывает на высокую эффективность предложенного способа вычитания ПОР на основе информации о поляризации по четырем осям и показывает существенное преимущество в сравнении с методами на основе анализа параметров вектора Стокса. Также следует отметить, что недостатком поляризационных матриц является существенно более низкая квантовая эффективность в рабочем диапазоне длин волн. Это обусловлено физикой работы поляризационного фильтра, который по своей природе снижает интенсивность проходящего светового потока минимум в два раза. Например, в аналогичных по характеристикам ПЗС матрицах Sony, отличающихся только маской фильтров, квантовая эффективность монохромной камеры составляет 64%, матрицы с RGB маской Байера 56%, матрицы с поляризационными фильтрами 25% по данным производителя. Очевидно, этот факт приводит к необходимости использования более длительных выдержек в подводных средах с низкой освещенностью. Этот недостаток наиболее существенен для систем подводного видения без искусственного источника света в своём составе. Однако, как показали представленные результаты исследования, при наличии искусственного источника света, возможность вычитания ПОР при использовании поляризационных матриц превалирует над более низкой квантовой эффективностью в контексте получения информации о сцене в мутной воде. Так, в результате эксперимента, в условиях минимальной прозрачности водной среды  $Z_D=0,12\text{м}$ , видимость сцены для камеры с маской Байера составила  $0,8*Z_D$ , в то время как при использовании метода вычитания ПОР из данных полученных с матрицы с поляризационными фильтрами удалось получить устойчивую визуализацию объектов съемки на расстоянии  $3*Z_D$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рогов А.А.* Фотосъемка под водой. – М.: Наука, 1964.
2. *Войтов А.А., Сергеев В.В., Соколов В.А., Форсов Б.Ю.* Формирование изображений в активных системах подводного видения // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения». – 2015. – Вып. № 5. – С. 21-31.
3. *Сергеев В.В., Карнов В.В., Прибылов Ю.С., Соколов В.А.* Активная система подводного видения для автономных необитаемых подводных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения». – 2019. – Вып. 2. – С. 53-61.
4. *Сергеев С.В., Карнов В.Н., Прибылов Ю.С., Пшеничная О.К., Соколов В.А.* Адаптивная система фото и видео регистрации для автономных необитаемых подводных аппаратов // Neftegaz.RU. – 2020. – Вып. № 8.
5. *Артюхов М.Ю.* Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами // Тр. научно-технической конференции–семинара. – Вып. 4 / под ред. Р.Р. Назирова. – М., 2011. – С. 230-245.
6. *Liu H.X.* Research of Underwater Machine Vision for AUV Recycling Control. – 2009.
7. *Орлов В.М., Карасик В.Е.* Лазерные системы видения. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001.
8. *Мартынов В.Л., Краснопольский В.Е., Мальцев А.Б.* Строблирующие лазерные телевизионные системы для подводных аппаратов // Судостроение. – 2005. – № 4 (761). – С. 46-482.
9. *Hou W.A.* simple underwater imaging model // Optics Letters. – No. 34 (17). – P. 2688-2690.
10. *Horvath H.G., Varju D.* Polarized Light in Animal Vision. – 2004.
11. *Shashar N., Hagan R., Boal J.G., Hanlon R.T.* Cuttlefish use polarization sensitivity in predation on silvery fish // Vision Research. – 2000. – No. 40 (1). – P. 71-75.
12. *Waterman T.H.* Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals // Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society. – 2006. – No. (1). – P. 111-115.
13. *Cartron L., Josef N., Lerner A., Mccusker S.D., Darmaillacq A.S., Dickel L., Shashar N.* Polarization vision can improve object detection in turbid waters by cuttlefish // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2013. – No. 447 (3). – P. 80-85.
14. *Schechner Y.Y., Narasimhan S.G., Nayar S.K.* Polarization-based vision through haze // Applied Optics. – 2003. – No. 42 (3). – P. 511-525.
15. *Schechner Y.Y., Karpel N.* Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis // Journal of Oceanic Engineering. – 2005. – No. 30 (3). – P. 570-587.
16. *Cheng H.Y., Chu J.K., Zhang R., Tian L.B., Gui X.Y.* Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules // International Journal of Remote Sensing. – 2020. – No. 41 (13). – P. 4947-4962.
17. *Hongyuan W., Haofeng H., Junfeng J., Xiaobo L., Weihong Z., Zhenzhou C., Tiegen L.* Automatic underwater polarization imaging without background region or any prior // Optics Express. – 2021. – No. 29 (20). – P. 31283-31295.
18. *Fei L., Yi W., Pingli H., Kui Y., Lu B., Xiaopeng S.* Polarization-based exploration for clear underwater vision in natural illumination // Optics Express. – 2019. – No. 27 (3). – P. 3629-3641
19. *Chang P., Flitton J., Hopcraft K/, Jakeman E.* Improving Visibility Depth in Passive Underwater Imaging by Use of Polarization // Applied Optics. – 2003. – No. 42 (15). – P. 2794-2803.
20. *Tianci Li, Jianli Wang, Kainan Yao.* Visibility enhancement of underwater images based on active polarized illumination and average filtering technology // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – No. 61 (1). – P. 701-708.

## REFERNCES

1. *Rogov A.A.* Fotos"emka pod vodoy [Photography under water]. Moscow: Nauka, 1964.
2. *Voytov A.A., Sergeev V.V., Sokolov V.A., Forsov B. Yu.* Formirovanie izobrazheniy v aktivnykh sistemakh podvodnogo videniya [Image formation in active underwater vision systems], *Voprosy radioelektroniki. Seriya «Tekhnika televideniya»* [Radio electronics issues. Series "Television technology"], 2015, Issue No. 5, pp. 21-31.

3. *Sergeev V.V., Karpov V.V., Pribylov Yu.S., Sokolov V.A.* Aktivnaya sistema podvodnogo videniya dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Active underwater vision system for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Voprosy radioelektroniki. Seriya "Tekhnika teledeniya"* [Radio electronics issues. Series "Television technology"], 2019, Issue 2, pp. 53-61.
4. *Sergeev S.V., Karpov V.N., Pribylov Yu.S., Pshenichnaya O.K., Sokolov V.A.* Adaptivnaya sistema foto i video registratsii dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Adaptive photo and video registration system for autonomous uninhabited underwater vehicles], *Neftegaz.RU*, 2020, Issue No. 8.
5. *Artyukhov M.Yu.* Opyt sozdaniya sistemy lokal'noy videonavigatsii dlya podvodnykh apparatov. Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya mobil'nymi ob"ektami [Experience in creating a local video navigation system for underwater vehicles. Technical vision in mobile object management systems], *Tr. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii–seminara* [Proceedings of the scientific and technical conference–seminar]. Issue 4, ed. by R.R. Nazirova. Moscow, 2011, pp. 230-245.
6. *Liu H.X.* Research of Underwater Machine Vision for AUV Recycling Control, 2009.
7. *Orlov V.M., Karasik V.E.* Lazernye sistemy videniya [Laser vision systems]. Moscow: MGTU im. Bauman, 2001.
8. *Martynov V.L., Krasnopol'skiy V.E., Mal'tsev A.B.* Strobiruyushchie lazernye televizionnye sistemy dlya podvodnykh apparatov [Strobing laser television systems for underwater vehicles], *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2005, No. 4 (761), pp. 46-482.
9. *Hou W.A.* simple underwater imaging model, *Optics Letters*, No. 34 (17), pp. 2688-2690.
10. *Horvath H.G., Varju D.* Polarized Light in Animal Vision, 2004.
11. *Shashar N., Hagan R., Boal J.G., Hanlon R.T.* Cuttlefish use polarization sensitivity in predation on silvery fish, *Vision Research*, 2000, No. 40 (1), pp. 71-75.
12. *Waterman T.H.* Reviving a neglected celestial underwater polarization compass for aquatic animals, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, No. (1), pp. 111-115.
13. *Cartron L., Josef N., Lerner A., Mccusker S.D., Darmaillacq A.S., Dickel L., Shashar N.* Polarization vision can improve object detection in turbid waters by cuttlefish, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, No. 447 (3), pp. 80-85.
14. *Schechner Y.Y., Narasimhan S.G., Nayar S.K.* Polarization–based vision through haze, *Applied Optics*, 2003, No. 42 (3), pp. 511-525.
15. *Schechner Y.Y., Karpel N.* Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis, *Journal of Oceanic Engineering*, 2005, No. 30 (3), pp. 570-587.
16. *Cheng H.Y., Chu J.K., Zhang R., Tian L.B., Gui X.Y.* Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules, *International Journal of Remote Sensing*, 2020, No. 41 (13), pp. 4947-4962.
17. *Hongyuan W., Haofeng H., Junfeng J., Xiaobo L., Weihong Z., Zhenzhou C., Tiegen L.* Automatic underwater polarization imaging without background region or any prior, *Optics Express*, 2021, No. 29 (20), pp. 31283-31295.
18. *Fei L., Yi W., Pingli H., Kui Y., Lu B., Xiaoepeng S.* Polarization–based exploration for clear underwater vision in natural illumination, *Optics Express*, 2019, No. 27 (3), pp. 3629-3641
19. *Chang P., Flitton J., Hopcraft K/, Jakeman E.* Improving Visibility Depth in Passive Underwater Imaging by Use of Polarization, *Applied Optics*, 2003, No. 42 (15), pp. 2794-2803.
20. *Tianci Li, Jianli Wang, Kainan Yao.* Visibility enhancement of underwater images based on active polarized illumination and average filtering technology, *Alexandria Engineering Journal*, 2022, No. 61 (1), pp. 701-708.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

**Будко Наталья Александровна** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: natalia.tb13@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185670210; инженер; аспирант кафедры электротехники и мехатроники.

**Будко Артём Юрьевич** – e-mail: artem\_budko@mail.com; тел.: +79281545833; с.н.с.; к.т.н.; доцент кафедры электротехники и мехатроники.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@gmail.com; тел.: +79198927349; в.н.с.; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой электротехники и мехатроники.

**Budko Natalia Aleksandrovna** – RDIRCS SFU; e-mail: natalia.tb13@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185670210; engineer; graduate student the department of electrical engineering and mechatronics.

**Budko Artem Yurievich** – e-mail: aptem\_budko@mail.com; phone: +79281545833; senior research officer; cand. of eng. sc.; associate professor the department of electrical engineering and mechatronics.

**Medvedev Mikhail Yurievich** – e-mail: medvmihal@gmail.com; phone: +79198927349; leading researcher; dr. of eng. sc.; professor, head the department of electrical engineering and mechatronics.

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-170-192

**В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Д.О. Бросалин, М.А. Васильева,  
Б.В. Гуренко, Н. Хамдан**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ  
В ДВУМЕРНЫХ КАРТОГРАФИРОВАННЫХ СРЕДАХ\***

*Исследуются задача планирования движения в двумерных картографированных средах. Проводится обзор и анализ известных алгоритмов планирования, базирующихся на диаграммах Вороного, вероятностной дорожной карте, быстро растущих случайных деревьев, алгоритмах Дейкстры,  $A^*$ ,  $D^*$  и их модификациях, искусственных потенциальных полях и интеллектуальных эвристиках. На основе проведенного анализа делается вывод о том, что классические методы в динамических средах требуют значительных затрат по времени расчетов и объему используемой памяти. Делается вывод об актуальности разработки алгоритмов, повышающих эффективность известных методов планирования. В этой связи данная статья посвящена разработке модифицированного алгоритма быстро растущих случайных деревьев и исследованию его эффективности по сравнению с известными методами. В статье представлен модифицированный алгоритм быстро растущих случайных деревьев, отличающийся тем, что при проверке наличия пути в новый потенциальный узел графа проверяется путь в некоторую область возле указанного узла. Это позволяет снизить количество узлов в строящемся дереве. Разработанный алгоритм вначале сравнивается с традиционным алгоритмом быстрорастущих случайных деревьев. Сравнение производится по времени расчета траектории, объему требуемой памяти, длине пути и проценту ситуаций, в которых успешно найдена траектория в целевую точку. Далее осуществляется сравнение разработанного алгоритма с алгоритмами планирования других классов. При исследовании используются репрезентативные выборки численных экспериментов и различные среды, отличающиеся плотностью расположения препятствий и наличием лабиринтов. Также проводится исследование алгоритмов планирования с использованием результатов экспериментов на наземном колесном роботе. По результатам численных и реальных экспериментов делаются выводы о преимуществах и недостатках разработанного алгоритма планирования движения и о целесообразности его применения в различных средах.*

*Планирование движения; двумерная среда, метод случайных деревьев, оптимизация алгоритмов планирования, сравнительный анализ.*

---

\* Работа при поддержке РФФИ, проект № 22-29-00533.