

Определение характеристик морской поверхности по радиолокационным изображениям с использованием градиентных методов

К. Ю. Лаптев, Н. В. Соколов, В. Н. Михайлов[✉], М. И. Богачев, Е. Н. Воробьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] vnmikhaylov@etu.ru

Аннотация

Введение. Дистанционное зондирование и мониторинг морской поверхности имеют огромное значение в контексте решения задач оперативной океанографии, экологического мониторинга и ряда др. Возможность оперативной оценки состояния морской поверхности особенно актуальна в зонах, представляющих опасность для судоходства, где быстрое и точное реагирование становится критически важным. Современные радиолокационные станции (РЛС) при обзоре формируют последовательности цифровых радиолокационных изображений (РЛИ), аналогичные последовательностям кадров в видеопотоке, что обуславливает возможность применения для их вторичной обработки градиентных методов, зарекомендовавших себя при анализе видеоданных.

Цель работы. Определение характеристик морского волнения по РЛИ с использованием методов градиентной оценки движения. Использование градиентных методов позволит реализовать дополнительные инструменты обработки изображений, формируемых при отражении зондирующих сигналов от морской поверхности.

Материалы и методы. Для оценки характеристик морской поверхности по РЛИ использованы градиентные методы. Для их обучения служили серии синтезированных изображений морской поверхности, полученные методом математического моделирования. Эффективность градиентных методов оценивалась по экспериментальным РЛИ, предоставленным ИО РАН им. Ширшова.

Результаты. С помощью градиентных методов вычислены направление и скорость волнения по нескольким последовательным обзорам РЛС. Построены регрессионные модели зависимости вычисленных значений от заданных. При определении направления волнения высокую эффективность продемонстрировали методы Farneback и TV-L1.

Заключение. Алгоритм вычисления скорости и направления смещения морской поверхности с помощью градиентных методов был предварительно обучен с применением модельных данных. Выполнена верификация реализованных методов и алгоритмов оценки скорости и направления морского волнения на предмет адекватности и реалистичности получаемых результатов сравнением с экспериментальными изображениями, найденными с использованием корабельных РЛС.

Ключевые слова: радиолокация, морская поверхность, алгоритм Лукаса–Канаде, алгоритм Farneback, TV-L1, линейная регрессия

Для цитирования: Определение характеристик морской поверхности по радиолокационным изображениям с использованием градиентных методов / К. Ю. Лаптев, Н. В. Соколов, В. Н. Михайлов, М. И. Богачев, Е. Н. Воробьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 41–53. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-41-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках темы Государственного задания FSEE-2020-0002.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ИО РАН им. Ширшова за любезно предоставленные данные экспериментальных океанографических наблюдений.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; принята к публикации после рецензирования 17.10.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



Measurement of Sea Surface Characteristics from Radar Images Using Gradient Methods

Kirill Yu. Laptev, Nikita V. Sokolov, Viacheslav N. Mikhailov✉,
Mikhail I. Bogachev, Evgenii N. Vorobev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉vnmikhaylov@etu.ru

Abstract

Introduction. Remote sensing and monitoring of the sea surface are of great importance in such fields, as operational oceanography, environmental monitoring, etc. The ability to quickly assess the state of the sea surface is particularly relevant in areas that pose a danger to shipping, where rapid and accurate response becomes critical. Modern radars represent information as digital image series largely reminiscent to a frame series in a video stream, thus enabling the use of gradient methods originally designed for and proven successful in video analysis.

Aim. Determination of sea wave characteristics from radar images using gradient motion estimation methods. The use of gradient methods will allow implementing additional tools for processing radar image series obtained from sea backscatter.

Materials and methods. To assess the characteristics of the sea surface from radar images, gradient methods were used. To train the methods, a series of synthetic images of the sea surface obtained by mathematical modeling were used. To evaluate the effectiveness of the gradient methods, two representative experimental radar image series provided by the Institute of Oceanography RAS were employed.

Results. Using gradient methods, the direction and speed of waves were calculated from several consecutive radar observations. Regression models of the dependence of calculated values on the specified ones were constructed. The Farneback and TV-L1 methods proved to be effective especially for obtaining the direction of the sea waves.

Conclusion. An algorithm for evaluating speed and direction of the sea surface displacement using gradient methods was pre-trained using simulated model data. The implemented methods and algorithms for assessing the speed and direction of sea waves were validated using two experimental image series obtained from shipborne navigational radars.

Keywords: radar, sea surface, Lucas–Kanade algorithm, Farneback algorithm, TV-L1, linear regression

For citation: Laptev K. Yu., Sokolov N. V., Mikhailov V. N., Bogachev M. I., Vorobev E. N. Measurement of Sea Surface Characteristics from Radar Images Using Gradient Methods. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 41–53. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-41-53

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education in the framework of the state assignment FSEE-2020-0002.

Acknowledgments. The authors would like to express their deep gratitude to the staff of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences for kindly providing experimental oceanographic observation data.

Submitted 21.06.2024; accepted 17.10.2024; published online 29.11.2024

Введение. Дистанционное зондирование и мониторинг морской поверхности имеют огромное значение как для обеспечения безопасности судоходства (в особенности в мелководьях, проливах, узкостях, где быстрое и точное определение характеристик морской поверхности становится критически важным), так и для решения задач экологического мониторинга и ряда др. Согласно требованиям морского регистра суда, допущенные к мореплаванию, независимо от назначения, в обязательном порядке оснащаются

навигационными радиолокационными станциями (РЛС), что обуславливает значительный размер парка эксплуатируемых устройств и систем. Современные РЛС предоставляют навигационную информацию в виде цифровых изображений, отображаемых на цветном или полутонном дисплее, формируемых при каждом обзоре. Таким образом, данные последовательных обзоров морской поверхности с использованием корабельных РЛС можно представить в виде серии цифровых изображений.

Ввиду изложенного перспективной представляется дополнительная обработка указанных изображений для определения характеристик морской поверхности с целью информирования об опасном для судоходства волнении, решения задач экологического мониторинга и ряда др. Для достижения цели необходимы методы обработки радиолокационных изображений, полученных при зондировании морской поверхности в зависимости от структуры и характеристик волнения. В статье описывается подход к определению динамических характеристик морского волнения по последовательным радиолокационным изображениям (РЛИ) с использованием методов градиентной оценки движения.

Градиентные методы оценки поля скоростей. Градиентные методы оценки движения объектов – это класс методов, используемых для определения скорости и направления движения объектов на основе анализа изменения их характеристик (например, яркости в случае видеоизображений) в пространстве и во времени.

Изначально полагалось, что при определении движения объекта значения яркости пикселей, относящихся к этому объекту, переходят от кадра к кадру без изменений [1–3]. Другими словами, интенсивность пикселей преобразуется от одного кадра к следующему:

$$I(\mathbf{x}, t) = I(\mathbf{x} + \mathbf{u}, t + 1),$$

где $I(\mathbf{x}, t)$ – интенсивность изображения как функция пространства $\mathbf{x} = (x, y)^T$ и времени t ; $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ – двумерная скорость.

Алгоритмы оптического потока предлагают способ оценки движения по последовательности изображений. Вычисление оптического потока играет ключевую роль в нескольких приложениях компьютерного зрения, включая обнаружение движения и сегментацию, интерполяцию кадров, реконструкцию трехмерной сцены, навигацию роботов и сжатие видео.

Алгоритм Лукаса–Канаде использует ограничение на постоянство интенсивности пикселей. Наличие двух неизвестных переменных в одном уравнении дает:

$$I_x v_x + I_y v_y + I_t = 0,$$

где I_x , I_y и I_t – производные функции изображения $I(x, y)$ относительно x , y и t . Вектор $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ определяет вектор скорости в направлениях x и y .

Метод Лукаса–Канаде – это задача локальной оптимизации, которую невозможно решить должным образом, если перемещения объекта слишком велики. Поскольку информация о градиенте получена по соседним пикселям, реальное движение объекта не может выходить за пределы рассматриваемой области. Кроме того, локальная область, учитываемая при использовании метода наименьших квадратов, конечна, и шансы правильно определить большие перемещения невелики. Поэтому обычно используется пирамидальная реализация. Размер входных изображений изменяется до более низкого разрешения – сначала фильтрацией с помощью фильтра нижних частот, а затем с помощью подвыборки с коэффициентом 2, что называется методом "от грубого к мелкому" (рис. 1). Расчет оптического потока начинается с изображений с самым низким разрешением на самом высоком пирамидальном уровне. Затем результат передается на уровень с более высоким разрешением в качестве начальной оценки. Выполнение алгоритма с более высоким разрешением приводит к повышению точности поля потока [4, 5].

Помимо классических алгоритмов оптического потока существуют более современные методы для оценки движения, например алгоритм Farneback. Он основан на аппроксимации соседствующих окрестностей для каждой пары кадров с помощью квадратичных полиномов за счет преобразования полиномиального разложения.

Идея полиномиального разложения заключается в аппроксимации некоторой окрестности каждого пикселя полиномом. Используются только квадратичные полиномы, дающие локальную модель сигнала, выраженную в локальной системе координат:

$$f(x) \sim x^T A x + \mathbf{b}^T x + c,$$

где A – симметричная матрица; $\mathbf{b}$ – вектор; c – скаляр. Коэффициенты оцениваются на основе взвешенного метода наименьших квадратов, соответствующего значениям сигнала в окрестности.

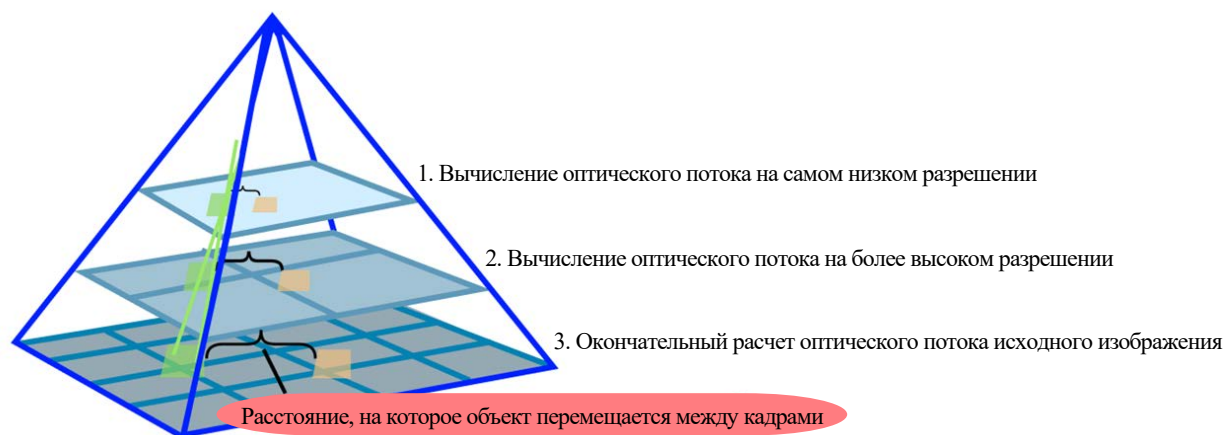


Рис. 1. Трехуровневая пирамида разрешений

Fig. 1. Three-level resolution pyramid

В методе Farneback используются локальные полиномиальные аппроксимации. Вычисления начинаются с полиномиального разложения двух кадров и получения коэффициентов разложения $A_1(x)$, $b_1(x)$ и $c_1(x)$ для первого изображения и $A_2(x)$, $b_2(x)$ и $c_2(x)$ для второго изображения.

Таким образом, алгоритм Farneback генерирует пирамиду изображений, где каждый уровень имеет разрешение ниже предыдущего уровня (рис. 1). При выборе уровня пирамиды, превышающего 1, алгоритм может отслеживать точки на нескольких уровнях разрешения, начиная с самого низкого уровня. Увеличение числа уровней пира-

миды позволяет алгоритму обрабатывать большие перемещения точек между кадрами [6].

Алгоритм вычисления оптического потока TV-L1 является вариационным, который в свою очередь относится к плотным методам и основывается на предположении о том, что яркость пикселей от кадра к кадру остается постоянной.

Вариационные методы вычисления оптического потока считаются наиболее точными, но при этом являются наиболее вычислительно сложными.

Решение вариационной задачи вычисления оптического потока через минимизацию функционала выражается следующим образом:

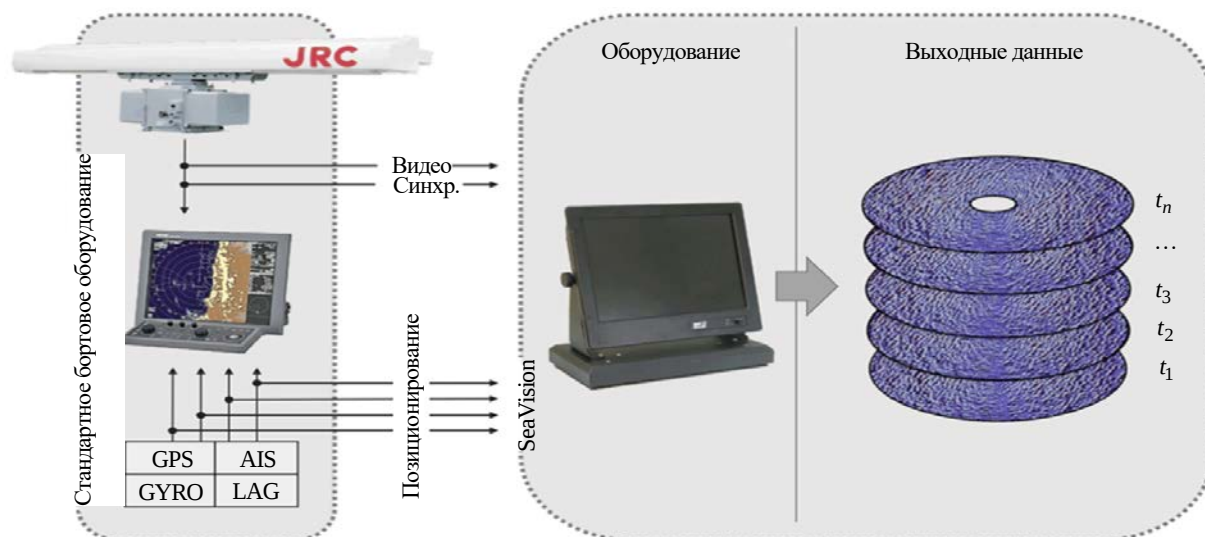


Рис. 2. Интеграция SeaVision в навигационное оборудование судна вместе с примером серии географически стабилизированных (в северном направлении) изображений морского волнения, по одному для каждого поворота антенны [9]

Fig. 2. SeaVision integration to the ship's navigational equipment together with an example of the series of the geographically stabilized (northward) sea clutter images, one for each antenna turn [9]

$$E(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int \left(\psi \left\{ [I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{x})]^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \gamma |\nabla I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - \nabla I(\mathbf{x})|^2 \right\} + \alpha \psi(|\nabla \mathbf{u}|^2 + |\nabla \mathbf{v}|^2) \right) d\mathbf{x},$$

где I – изображение; $\mathbf{x} = (x, y, t)^T$ – координаты пикселя на изображении; $\mathbf{w} = (u, v, 1)^T$ – вектор смещения между пикселями двух изображений в моменты времени t и $t+1$; $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^T$ – пространственный градиент; γ – коэффициент между яркостью и градиентом яркости; $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, формализующий требование к гладкости искомого вектора смещений; $\psi(s^2) = \sqrt{s^2 + \varepsilon^2}$ – функция регуляризации, определяющая устойчивость минимизации функционала к изменениям яркости и гладкости поля [7].

В отличие от алгоритма Lucas–Kanade, TV-L1 наиболее устойчив к нарушениям постоянства яркости пикселей. Алгоритм, реализующий этот метод, можно разделить на 2 модуля: процедуру вычисления оптического потока в заданном масштабе и основной алгоритм, который реализует пирамидальную схему и вызывает процедуру для получения приближенных решений.

Процедура обновляет векторное поле $\mathbf{u}$ и использует 3 временных векторных поля $\mathbf{v}$, $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ для выполнения промежуточных вычислений. Начальное значение $\mathbf{u}_0$ из $\mathbf{u}$ задается прилагаемой многомасштабной процедурой и на самом грубом уровне равно нулю [8].

В библиотеке для обработки изображений scikit-image есть функция TV-L1, которая реализует алгоритм для вычисления оптического потока. Функция TV-L1 принимает 2 изображения как входные данные и возвращает матрицу оптического потока. Каждое значение в матрице оптического потока представляет собой скорость изменения пикселя в направлениях x и y .

Получение радиолокационных картин морской поверхности. В описываемой работе в качестве исходных данных используются РЛИ, полученные по результатам двух серий измерений, выполненных сотрудниками ИО РАН им. Ширшова в рамках экспедиционных исследований в Северной Атлантике [9]. Данные регистрировались интегрированной системой

SeaVision, предназначенной для наблюдений за морской поверхностью и волнами в открытом океане с использованием стандартных навигационных морских радаров X-диапазона. Данные дистанционного зондирования сверялись с измерениями на месте, которые были доступны с буев (таких, как буи NDBC или NOWPHAS). Буи измеряют вертикальные и горизонтальные смещения поверхности океана (например, буй-корректировщики или буи для сбора данных с частотой дискретизации до 2.5 Гц) и предоставляют высокоточные оценки характеристик взволнованной морской поверхности.

Система SeaVision использовалась в режиме свободного дрейфа судна с выключенными двигателями совместно со свободно дрейфующим буюм-наблюдателем, что позволяло независимо измерять характеристики морского волнения с помощью данной системы и измерительного буя. Записи выполнялись в свободном плавании на протяжении не менее 30 мин. Кроме того, в течение всего времени измерений регистрировались стандартные метеорологические параметры с помощью бортовой метеостанции.

Научно-исследовательские суда "Академик Сергей Вавилов" и "Академик Иоффе" оснащены стандартными навигационными радаром X-диапазона JRC JMA-9110-6XA и JMA-9122-6XA, технические характеристики которых приведены в [9]. Оба радара работают на частоте 9.41 ГГц (длина волны ≈ 3 см) и оснащены 6-футовой антенной с горизонтальным разрешением по направлению 1.2° . Опционально радары могут работать с длительностью импульсов 0.08, 0.25, 0.5, 0.8 и 1.0 мкс. В данном случае использовалась наименьшая возможная длительность импульса – 0.08 мкс (в так называемом режиме короткого импульса – SP1), обеспечивая максимально возможное разрешение изображения (и, следовательно, наилучшее разрешение поверхности океана). Данные радары X-диапазона характеризуются длиной волны излучаемых электромагнитных волн 3.18 см. Длительность импульса – это время излучения волнового пучка; таким образом, количество излучаемых волн и площадь отражения на поверхности океана (определяющая пространственное разрешение) увеличиваются с ростом продолжительности импульса.

SeaVision обеспечивает оцифровку и дальнейшую запись стабилизированного по направлению (на север) радарного изображения морской поверхности, получаемого при каждом полном обороте антенны, а также преобразование изображения морской поверхности в цифровой формат и его сохранение на внешнем запоминающем устройстве. Также независимо регистрируются географические координаты судна по данным ГНСС, скорость движения и курс по данным автономных измерителей. Полученные РЛИ морской поверхности при каждом обороте РЛС сохраняются в виде матрицы размером 4096×4096 (дискретизация 1.875 м при 4096 направлениях луча). На этапе последующей обработки эти файлы дополнительно объединяются и преобразуются в формат NetCDF [9].

Моделирование морского волнения под влиянием ветров и течений. Основная идея использованной математической модели состоит в представлении морской поверхности в виде суперпозиции числа элементарных волн с различными собственными параметрами. Статистическое моделирование морской поверхности при таком подходе можно реализовать методом гармонического синтеза [10–12]. Тогда амплитуда волнений

$$z(x, y, t) = \sum_{p=1}^{N_{\omega}} \sum_{q=1}^{N_{\psi}} \sqrt{2S_{p,q} \Delta\omega \Delta\psi} \times \\ \times \sin[k(x \cos(\psi) + y \sin(\psi)) - \omega t + \varepsilon],$$

где N_{ω} – число составляющих частотного спектра; N_{ψ} – число составляющих углового спектра; $S_{p,q}$ – матрица энергетического спектра; $\Delta\omega = \frac{\omega_{\max}}{N_{\omega}}$ – шаг по частоте, рад/с; $\Delta\psi = \frac{2\pi}{N_{\psi}}$ – шаг по углу, рад; x, y, t – текущие пространственно-временные координаты; k – волновое число.

Глубина освещаемого участка водоема при моделировании задается через дисперсионное соотношение [13]:

$$\omega = \sqrt{gk \left(1 + \frac{\sigma}{\rho g} k^2 \right) \text{th}(kR)},$$

где k – волновое число; $\sigma = 74.34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ – поверхностное натяжение на границе раздела сред воздух/морская вода; ρ – плотность воды; R – глубина моря.

Вышеприведенные формулы для угловых спектров соответствуют направлению ветра вдоль оси OX . Направление ветра учитывается в формуле для построения профиля морской поверхности заменой координат: $x \rightarrow x_{\varphi}$; $y \rightarrow y_{\varphi}$ с помощью преобразования [9]:

$$\begin{cases} x_{\varphi} = x \cos(\varphi) - y \sin(\varphi), \\ y_{\varphi} = y \sin(\varphi) + x \cos(\varphi). \end{cases}$$

Для обеспечения идентичности процедуры обработки модельных и экспериментальных данных с учетом системы координат, пространственно-временного разрешения и размерности данных моделирование производилось в полярных координатах [11]:

$$z(r, \theta, t) = \sum_{p=1}^{N_{\omega}} \sum_{q=1}^{N_{\psi}} \sqrt{2S_{p,q} \Delta\omega \Delta\psi} \times \\ \times \sin\{k[r \cos(\theta) \cos(\psi) + r \sin(\theta) \sin(\psi)] - \omega t + \varepsilon\}.$$

Направление ветра в этом случае учитывается следующей заменой переменной: $\theta_{\varphi} = \theta + \varphi$.

Двумерный энергетический спектр представляется произведением [13]:

$$S(\omega, \psi) = S_1(\omega) S_d(\omega, \psi),$$

где $S_1(\omega)$ – одномерный спектр волнения, показывающий распределение энергии морского волнения по частотам; $S_d(\omega, \psi)$ – угловой спектр, характеризующий распределение энергии по азимуту.

Одномерный спектр ветровых волн обычно описывается спектром Пирсона–Московица [14]:

$$S_1(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} g^2 \omega^{-5} \exp[-0.74(\omega_m/\omega)^4],$$

где $\omega_m = \frac{g}{v_{19.5}}$; g – ускорение свободного падения; $v_{19.5}$ – скорость ветра на высоте 19.5 м, или же с помощью спектра JONSWAP [15]:

$$S_1(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \times \\ \times \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \mu \exp \left[\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\beta^2 \omega_m^2} \right],$$

$$\text{где } \alpha = 0.076 \left(\frac{v_{10}^2}{gX} \right)^{0.22}; \quad \mu = 3.3; \quad \begin{cases} \beta = 0.07, & \omega \leq \omega_m, \\ \beta = 0.09, & \omega > \omega_m; \end{cases}$$

X – область разгона, м; v_{10} – скорость ветра на высоте 10 м.

Частота максимума спектра

$$\omega_m = 7\pi \left(\frac{g^2}{v_{10} X} \right)^{0.33}.$$

В описываемой работе для моделирования использовался спектр JONSWAP, поскольку он имеет большую энергию вблизи максимума, что позволяет получить более ярко выраженное волнение.

Угловой спектр морского волнения можно описать различными выражениями, основные из которых представлены в [11]. Для моделирования было выбрано представление, использующее аппроксимацию спектра на основе квадрата косинуса [10, 16]:

$$S_d(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta), \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2},$$

где $\theta = \psi - \psi_0$; ψ_0 – угол между направлением наблюдения и направлением ветра.

В дальнейшем результат моделирования преобразовывался в декартовы координаты для обучения исследуемых алгоритмов. Итог работы программы моделирования – изображение морской поверхности (рис. 3).

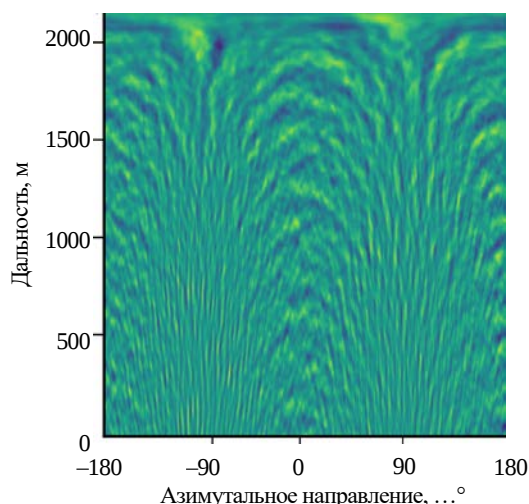


Рис. 3. Результат моделирования морской поверхности с учетом времени вращения лоатора

Fig. 3. Modeling the sea surface, taking the locator rotation time into account

Вычисление направления и скорости волн градиентными методами. Для адаптации градиентных методов к условиям поставленной задачи необходимо учесть, что "типичную" съемку можно считать мгновенной, поскольку короткая выдержка и большая пауза между кадрами, а формирование РЛИ – непрерывный процесс. Следовательно, появится систематическая линейная составляющая ошибки, которую необходимо компенсировать. Кроме того, исходные данные представлены в системе "азимут-дальность", а методы рассчитаны на декартову систему координат, в связи с чем необходим переход из одной системы координат в другую (рис. 4).

В работе для определения направления и скорости волнения по моделям картин морской поверхности используются 3 метода: Lucas–



Рис. 4. Перевод данных из системы "азимут-дальность" в декартову систему координат

Fig. 4. Converting data from the azimuth-range system to the Cartesian coordinate system

Kanade, Farnebäck и TV-L1. Для моделей картин морской поверхности заданы характеристики:

- скорость приповерхностного ветра ($v_w = 5, 10$ м/с);
- направление приповерхностного ветра ($d_w = 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135$ и 157.5°);
- скорость течения ($v_c = 0.5$ м/с);
- направление течения ($d_c = 0^\circ$);
- время полного оборота радара ($t_{obs} = 2.4$ с).

Каждый файл данного вида моделей состоит из пяти кадров, имитирующих 5 последовательных круговых обзоров РЛС.

В табл. 1 представлены средние значения времени выполнения каждого метода для одного файла (5 кадров). Эти значения получены для процессора i5-9300H с использованием стандартных процедур без дополнительной оптимизации под параллельные вычисления и могут быть потенциально уменьшены при реализации адаптированного кода под параллельные вычислители.

На рис. 5 представлены боксовые диаграммы среднеквадратичной ошибки (RMSE) оце-

ненных значений скорости смещения морской поверхности. Использованы результаты накопления статистики по всем направлениям при заданных значениях скорости ветра 5 и 10 м/с. При этом истинная скорость смещения морской поверхности оценивалась как суммарный вектор течения и приповерхностного ветра. Из рис. 5 видно, что с увеличением скорости ветра ошибка ее оценки уменьшается, и при слабом ветре наименьшей ошибкой характеризуется метод Farnebäck.

Для оценки эффективности каждого из методов были построены модели линейной регрессии, вычислен коэффициент детерминации R^2 , скорректированный (Adjusted) R^2 и определена статистическая значимость регрессионных моделей (p -value). Переменные-предикторы – вычисленные методами Lucas–Kanade, Farnebäck и TV-L1 значения направления и скорости волн. Целевая переменная – заданные в моделях значения направления и скорости волн.

В табл. 2 и 3 приведены уравнения регрессии и статистики для трех методов определения направления и скорости движения волн соответственно.

Визуализация результатов регрессии по определению направления движения волн представлена на рис. 6, где по оси абсцисс отложены заданные в моделях значения направления волн, а по оси ординат – вычисленные тремя градиентными методами (данные стандартизированы).

Табл. 1. Среднее время выполнения методов оценки движения
Tab. 1. Average execution time of motion estimation methods

Метод	Затраченное время, с
Lucas–Kanade	2
Farnebäck	16
TV-L1	251

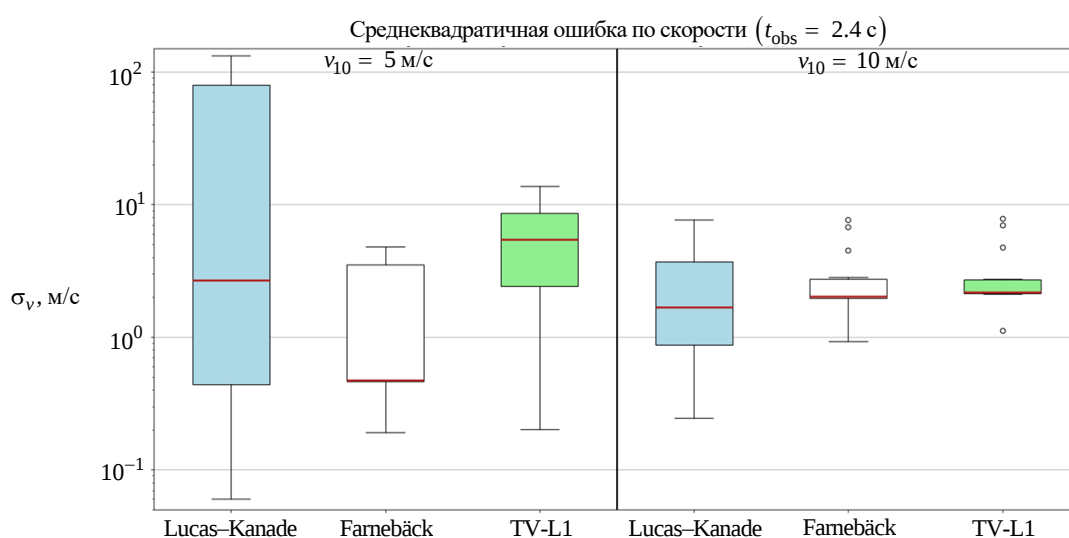


Рис. 5. Боксовые диаграммы для среднеквадратичной ошибки по скорости

Fig. 5. Box plots for the RMSE of the calculated speed values

Табл. 2. Результаты регрессии для определения направления

Tab. 2. Regression results for determining direction

Метод	Уравнение регрессии	R^2	Adj. R^2	p -value
Lucas–Kanade	$y = 18.2641 + 0.9026x$	0.800	0.792	$7.24 \cdot 10^{-10}$
Farneback	$y = 22.0069 + 0.9277x$	0.775	0.766	$3.01 \cdot 10^{-9}$
TV-L1	$y = 23.1308 + 0.9029x$	0.776	0.767	$2.86 \cdot 10^{-9}$

Табл. 3. Результаты регрессии для определения скорости

Tab. 3. Regression results for determining velocity

Метод	Уравнение регрессии	R^2	Adj. R^2	p -value
Lucas–Kanade	$y = 86.4140 + 5.8806x$	0.058	0.019	0.234
Farneback	$y = 4.9579 + 0.2334x$	0.379	0.354	0.000806
TV-L1	$y = 9.8675 + 0.0821x$	0.005	0.005	0.724

Результаты показывают, что градиентные методы обладают высокой эффективностью при определении направления движения волн. Однако их эффективность при нахождении скорости движения волн значительно хуже, только Farneback имеет статистическую значимость.

После обучения алгоритма на модельных данных произведено апробирование на РЛИ, полученных от ИО РАН им. Ширшова по результатам двух экспедиций в Северную Атлантику. По вычисленным тремя методами значениям направления волн построены боксовые диа-

граммы (рис. 7), где синей горизонтальной линией отображено направление ветра (5 и 10 м/с), полученное от судовой метеостанции, а штриховой линией – направление дрейфа буя. Для уточненной оценки характеристик морской поверхности сформированные векторы усредняются по всей площади изображения и по 51 последовательному обзору РЛС.

Заключение. Для реализации радиолокационных систем и последующего анализа получаемых данных строятся модели. Возможность использования тех или иных методов для опре-

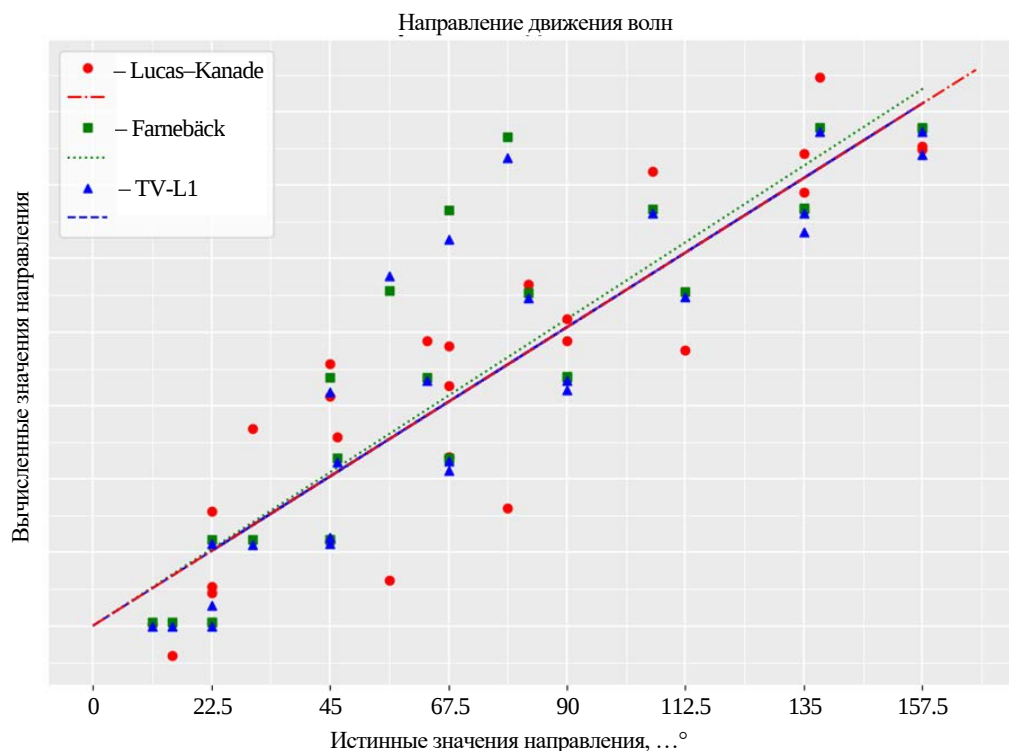


Рис. 6. Результаты построения линейной регрессии

Fig. 6. Results of constructing linear regression

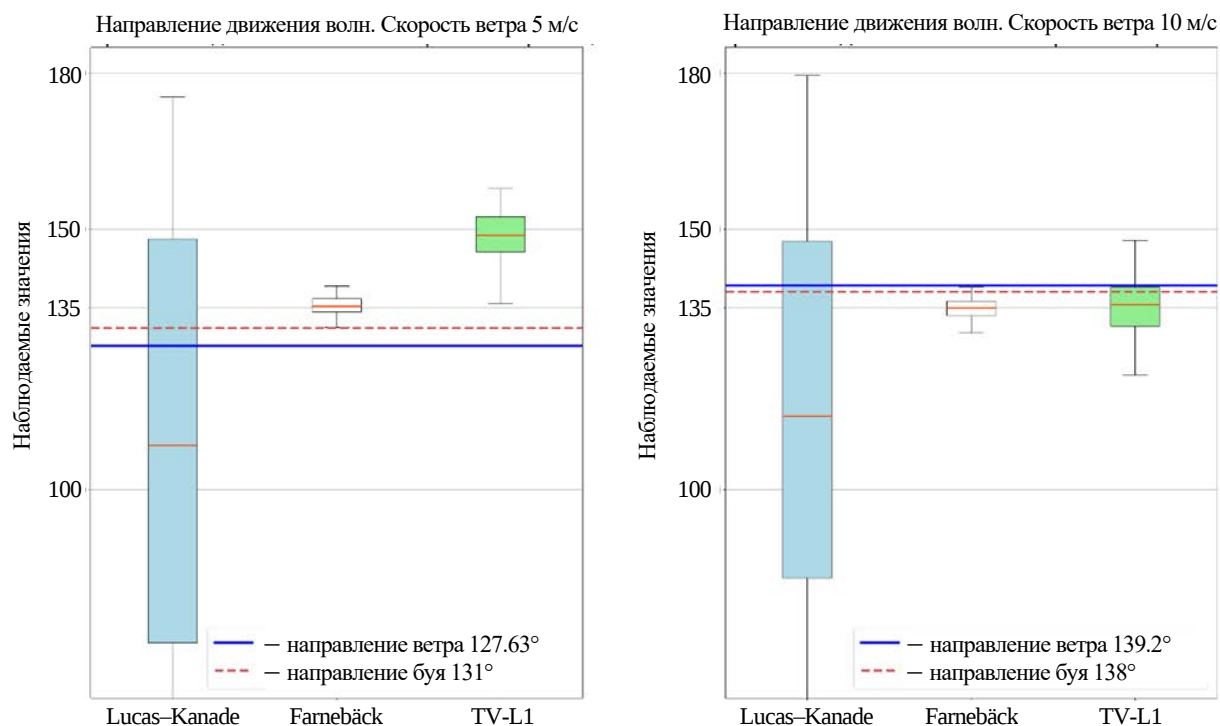


Рис. 7. Боксовые диаграммы вычисленных значений направления волн

Fig. 7. Boxplots of computed wave direction values

деления характеристик акватории определяется на моделях. Выполнена верификация разработанной программы синтеза картин морской поверхности на предмет адекватности и реалистичности получаемых результатов моделирования посредством сравнения с записями, полученными с использованием корабельных РЛС.

В описанной работе предлагается дополнительная обработка радиолокационных сигналов, отраженных от морской поверхности, при помощи градиентных методов с целью информирования об опасном для судоходства волнении.

После построения моделей линейной регрессии и получения коэффициентов уравнений (наклон линии регрессии) алгоритм был обучен на модельных данных и протестирован на реальных.

Результаты показывают, что при слабом ветре методы Lucas-Kanade и TV-L1 демон-

стрируют низкую эффективность в определении скорости движения волн. Это связано с их чувствительностью к слабым скоростям движения объектов. В то же время, метод Farnebäck продемонстрировал устойчивость и способность определять скорость даже в условиях слабого ветра. Для определения направления эффективны методы Farnebäck и TV-L1 (значения скорректированного коэффициента R^2 составляют 0.766 и 0.767 соответственно). Однако TV-L1 требует значительно больших временных затрат, чем Farnebäck и Lucas-Kanade. Самым эффективным методом с точки зрения точности и быстродействия для определения направления и скорости волнения по радиолокационным изображениям морской поверхности оказался Farnebäck, в связи с чем целесообразно использовать именно его.

Авторский вклад

Лаптев Кирилл Юрьевич – статистический анализ данных; программная реализация алгоритма для обработки данных; визуализация и статистическая оценка значимости полученных результатов.

Соколов Никита Владимирович – разработка алгоритма и реализация программного модуля; обеспечивающего моделирование морского волнения.

Михайлов Вячеслав Николаевич – разработка математической модели морской поверхности.

Богачев Михаил Игоревич – разработка концепции исследований и интерпретация результатов.

Воробьев Евгений Николаевич – статистическая обработка экспериментальных данных; валидация результатов исследований.

Author's contribution

Kirill Yu. Laptev, performing statistical analysis of data; writing an algorithm for data processing; visualization and statistical assessment of the significance of the results obtained.

Nikita V. Sokolov, development of an algorithm and implementation of a software module that provides modeling of sea waves.

Viacheslav N. Mikhailov, development of a mathematical model of the sea surface

Mikhail I. Bogachev, development of the research concept and interpretation of the results.

Evgenii N. Vorobev, statistical processing of experimental data; validation of the results.

Список литературы

1. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical Flow // Artificial Intelligence. 1981. № 17. P. 185–204.
2. Freeman W., Adelson E. H. The design and use of steerable filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991. Vol. 13, iss. 9. P. 891–906. doi: 10.1109/34.93808
3. Feet D., Weiss Y. Optical Flow Estimation. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. New York: Springer, 2006. P. 237–257. doi: 10.1007/0-387-28831-7
4. Bouquet J. Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description. Santa Clara, USA: Intel Corporation Microsoft Research Lab, 2000. P. 1–9.
5. Sharmin N., Brad R. Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow // Sensors. 2012. Vol. 12, iss. 9. P. 12694–12709. doi: 10.3390/s120912694
6. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // Proc. of the 13th Scandinavian Conf. on Image Analysis, Halmstad, Sweden, SCIA, 2003. P. 363–370.
7. Беляков П. В., Никифоров М. Б. Вариационный метод вычисления оптического потока в системе-на-кристалле // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 76–82.
8. Pérez J. S., Meinhardt E., Facciolo G. TV-L1 Optical Flow Estimation // Image Processing On Line. 2013. № 3. P. 137–150. doi: 10.5201/ipol.2013.26
9. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III / N. Tilinina, D. Ivonin, A. Gavrikov, V. Sharmar, S. Gulev, A. Suslov, V. Fadeev, B. Trofimov, S. Bargman, L. Salavatova, V. Koshkina, P. Shishkova, O. Razorenova, A. Sokov // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14, iss. 8. P. 1–25. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022
10. Абузьяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 166 с.
11. Флуктуационный анализ моделей морской поверхности / В. Н. Михайлов, Н. С. Пыко, М. И. Богачев, В. М. Кутузов // Вестн. НовГУ. 2023. Т. 130, № 1. С. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145
12. Massel S. R. Ocean Surface Wave: Their Physics and Prediction. World Scientific Publishing, 1996. 491 p.
13. Пыко Н. С., Орандаренко Е. Д., Богачев М. И. Статистический анализ локальных экстремумов взволнованной морской поверхности на основе данных математического моделирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Vol. 26, № 5. P. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111
14. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas-Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii // J. of Geophysical Research. 1964. Vol. 69, № 24. P. 5181–5190.
15. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / K. Hasselmann, T. Barnett, E. Bouws et al. Hamburg: Deutsches Hydrographisches institute, 1973. 95 p.
16. Modeling arrival scattering due to surface roughness / O. C. Rodriguez, A. J. Silva, J. P. Gomes, S. M. Jesus // Proc. of the 10th European Conf. on Underwater Acoustics, Istanbul, Turkey, 5–9 July 2010. P. 1–8.

Информация об авторах

Лаптев Кирилл Юрьевич – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2024), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – статистический анализ данных, математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: kirikill76@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2110-0568>

Соколов Никита Владимирович – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)). Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: falconsnv@yandex.ru

Михайлов Вячеслав Николаевич – инженер по специальности "Радиотехника" (2000), старший научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация; математическое моделирование. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vnmikhaylov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8155-9310>

Богачев Михаил Игоревич – доктор технических наук (2018), доцент (2011), профессор кафедры радиотехнических систем, главный научный сотрудник научно-образовательного центра "Цифровые телекоммуникационные технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 200 научных работ. Сфера научных интересов – статистический анализ данных; математическое моделирование. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: rogex@yandex.com
<http://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

Воробьев Евгений Николаевич – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – полуактивная радиолокация; радиолокационное распознавание. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: envorobev@etu.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

References

1. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical Flow. Artificial Intelligence. 1981, no. 17, pp. 185–204.
2. Freeman W., Adelson E. H. The Design and Use of Steerable Filters. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991, vol. 13, iss. 9, pp. 891–906. doi: 10.1109/34.93808
3. Feet D., Weiss Y. Optical Flow Estimation. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. New York, Springer, 2006, pp. 237–257. doi: 10.1007/0-387-28831-7
4. Bouguet J. Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description. Santa Clara, USA, Intel Corporation Microsoft Research Lab, 2000, pp. 1–9.
5. Sharmin N., Brad R. Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow. Sensors. 2012, vol. 12, iss. 9, pp. 12694–12709. doi: 10.3390/s120912694
6. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. Proc. of the 13th Scandinavian Conf. on Image Analysis, Halmstad, Sweden, SCIA, 2003, pp. 363–370.
7. Belyakov P. V., Nikiforov M. B. *Variacionnyy metod vychisleniya opticheskogo potoka v sisteme-nakristalle* [System-on-Chip Variational Optical Flow Computation]. Digital Signal Processing, 2018, no. 3, pp. 76–82. (In Russ.)
8. Pérez J. S., Meinhardt E., Facciolo G. TV-L1 Optical Flow Estimation. Image Processing On Line. 2013, no. 3, pp. 137–150. doi: 10.5201/ipol.2013.26
9. Tilinina N., Ivonin D., Gavrikov A., Sharmar V., Gulev S., Suslov A., Fadeev V., Trofimov B., Bargman S., Salavatova L., Koshkina V., Shishkova P., Razorenova O., Sokov A. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and Its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III. Earth System Science Data. 2022, vol. 14, iss. 8, pp. 1–25. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022
10. Abuzyarov Z. K. *Morskoye volneniye i yego prognozirovaniye* [Sea Waves and Its Forecasting]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 166 p. (In Russ.)
11. Mikhailov V. N., Pyko N. S., Bogachev M. I., Kutuzov V. M. Fluctuation Analysis of Sea Surface Models. Vestnik NovSU. 2023, vol. 130, no. 1, pp. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145
12. Massel S. R. Ocean Surface Wave: Their Physics and Prediction. World Scientific Publishing, 1996, 491 p.
13. Pyko N. S., Orandarenko E. D., Bogachev M. I. Statistical Analysis of Local Extrema in Rough Sea Surfaces Based on Computer Simulation. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 99–111. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-99-111 (In Russ.)
14. Pierson W. J., Moskowitz L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas-Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii. J. of Geophysical Research. 1964, vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190.
15. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E. et al. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Hamburg, Deutsches Hydrographisches Institute, 1973, 95 p.
16. Rodriguez O. C., Silva A. J., Gomes J. P., Jesus S. M. Modeling Arrival Scattering Due to Surface Roughness. Proc. of the 10th European Conf. on Underwater Acoustics, Istanbul, Turkey, 5–9 July 2010. P. 1–8.

Information about the authors

Kirill Yu. Laptev, Master in Infocommunication Technology and Communications Systems (2024), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: kirikill76@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-2110-0568>

Nikita V. Sokolov, Specialist in "Radioelectronic systems and complexes" (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University). Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: falconsnv@yandex.ru

Viacheslav N. Mikhailov, Engineer in Radiotechnics (2000), Senior Researcher of the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vnmikhaylov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8155-9310>

Mikhail I. Bogachev, Dr Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor (2011), Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Chief Researcher of the Scientific and Educational Center "Digital Telecommunication Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 200 scientific publications. Area of expertise: statistical data analysis; mathematical modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: rogex@yandex.com

<http://orcid.org/0000-0002-0356-5651>

Evgenii N. Vorobev, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Senior Researcher at the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: passive radar; recognition of radar targets.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: envorobev@etu.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>
