Анализ точности восстановления высот индивидуальных волн при измерении прибрежным СВЧ радиолокатором по данным стохастического моделирования взволнованной морской поверхности

П.В. Чернышов¹, Д.В. Ивонин¹, С.А. Мысленков², З.А. Халиков¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: pavel_chv89@mail.ru

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Работа посвящена оценке точности метода обращения радиоярких изображений некогерентного СВЧ радиолокатора в карты возвышений взволнованной морской поверхности. Основой техники является применение к трёхмерному комплексному спектру последовательности амплитудных радиолокационных (РЛ) изображений фильтра высоких частот и фильтра дисперсионного соотношения с поправкой на глубину и среднюю скорость поверхностного течения. Методика включает также применение эмпирической модуляционно-передаточной функции для амплитуды и фазы комплексных спектральных компонент. Подобная техника впервые применена для данных, полученных в прибрежной зоне северо-восточной части Чёрного моря (Южное отделение ИО РАН, г. Геленджик). Валидация метода была проведена с помощью серии численных экспериментов с применением стохастического моделирования взволнованной морской поверхности. После получения модельных данных о возвышении поверхности воды к ним применялись основные изображающие механизмы локатора для скользящих углов зондирования, а именно модуляции затенениями и уклонами волн. Также к моделям РЛ изображений применялся мультипликативный шум. Сравнение изначальных синтетических карт возвышений взволнованной морской поверхности с восстановленными показало среднюю по координатам и времени точность метода на уровне 15% от значительной высоты волнения.

Ключевые слова: СВЧ радиолокатор, прибрежная зона, восстановление высот индивидуальных волн

Одобрена к печати: 05.08.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-68-78

Введение

Некогерентные прибрежные СВЧ-радиолокаторы уже давно успешно применяются для исследования состояния взволнованной морской поверхности. Такие радиолокационные станции, снабженные модулем оцифровки данных, являются практически всепогодными и не зависящими от времени суток приборами для широкого класса прикладных задач. Они используются для оценки направленного спектра волнения и его характеристик (Nieto Borge et al., 1999, 2008; Nieto Borge, Soares, 2000), среднего приповерхностного течения, локальной батиметрии (Serafino et al., 2010), скорости приповерхностного ветра (Dankert et al., 2003), интенсивности осадков. В работе (Nieto Borge et al., 2004) была предложена методика обращения последовательности радиолокационных снимков в карты возвышений взволнованной морской поверхности, однако подробная верификация предложенного метода не была проведена даже на наборе синтетических данных. Целью данной работы является изучение возможностей предложенного метода для восстановления высот индивидуальных волн для экстремально больших углов зондирования (89,2–89,7 градусов). Постановка эксперимента по сравнению с натурными данными даже в точке представляется затруднительной из-за необходимости очень точной синхронизации по времени и пространству. Поэтому для проведения верификации метода было привлечено

стохастическое численное моделирование. Для получения моделей радиолокационных изображений к последовательности изначальных возвышений взволнованной поверхности применялись модуляции затенениями, уклонами волн и добавлялся мультипликативный гауссов шум. Также предложенная техника была применена для радиолокационных данных, полученных в районе Голубой бухты, г. Геленджик на базе Южного Отделения Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Моделирование взволнованной морской поверхности

Ограничиваясь лишь линейной теорией, взволнованную морскую поверхность можно представить как следующую сумму гармоник:

$$\zeta(x,y,t)=\sum_{i=1}^{N_k}\sum_{j=1}^{N_\theta}A_{ij}\cdot\cos\left(\omega_{ij}t-k_{x_{ij}}x-k_{y_{ij}}y-\varphi_{ij}\right), \tag{1}$$

где N_k и N_θ – количество шагов по модулю и углу волнового вектора соответственно, $k_{x_{ij}}=k_i\cos\theta_j$, $k_{y_{ij}}=k_i\sin\theta_j$ – волновые числа, φ_{ij} – равномерно распределённые на интервале $[0; 2\pi)$ случайные фазы начальных гармоник, ω_{ij} – частоты, связанные с волновыми числами линейным дисперсионным соотношением для волн над глубиной d с поправкой на скорость поверхностного течения $\vec{U}$: $\omega_{ij}=\sqrt{gk_i th(k_i d)}+(\vec{k}\cdot\vec{U})$ (g – ускорение свободного падения), A_{ij} – амплитуда гармоники с номером (i, j) , определяемая следующим образом:

$$A_{ij}=\sqrt{2S_{k_i}D_{ij}\Delta k\Delta\theta},$$

здесь Δk и $\Delta\theta$ – интервалы дискретизации по волновому числу и углу соответственно, S_{k_i} – энергия i -той гармоники, предписываемая одномерным спектром JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) с параметром пиковатости $\gamma=3,3$, D_{ij} – функция углового распределения волновой энергии (Mitsuyasu et al., 1975) с параметрами, соответствующими ветровому волнению. Используемый подход к моделированию взволнованной морской поверхности близок к методикам, предложенным в статьях (Nieto Borge et al., 2004; Salcedo-Sanz et al., 2015). Параметры численного моделирования приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Параметры численного моделирования

Параметр	Значение
Δk ($k\in[0,01; 3]$ рад/м)	0,01 рад/м
$\Delta\theta$ $\left(\theta\in\left[-\pi/2;\pi/2\right]\right)$	0,01 рад
Шаг по дальностной координате	1 м
Шаг по азимутальной координате	0,017 рад

Шаг по координатам декартовой сетки ($\Delta x, \Delta y$)	2 м
Шаг по времени	2 с
Количество шагов по времени	82

Для оценки качества моделирования было проведено сравнение корреляционных функций, полученных из смоделированных одномерных данных о возвышении взволнованной морской поверхности и аналитического выражения для одномерного аналога формулы (1) $\sum_{i=1}^N A_i^2 \cos\left(k_i x / 2\right)$ (см. рис. 1 справа).

Описание основных изображающих механизмов радиолокатора при настильных углах зондирования

Для симуляции эффекта радарной съёмки моделирование проводилось на полярной сетке с шагом по дальности и по азимуту, соизмеримым с разрешением локатора в соответствующем направлении. Предполагается, что зондирование проводится до дальностей 1–2 км антенной с шириной диаграммы направленности в азимутальной плоскости 1 градус. Дискретизация по времени соответствует периоду полного оборота локатора (2 с). Высота установки локатора $H=20$ м, поляризация сигнала горизонтальная.

Согласно двухмасштабной модели рассеяния, длинные энергонесущие волны становятся различимыми на радиолокационных изображениях вследствие геометрической и гидродинамической модуляции РЛ сигнала морской поверхностью (Kanevsky, 2009). В качестве основных геометрических модуляций при настильных углах зондирования рассматриваются модуляции затенениями (эффект частичного затенения поверхности моря профилем более высоких волн) и уклонами волн. Последний эффект возникает из-за изменения локального эффективного угла скольжения вдоль склона крупной волны. Гидродинамическая модуляция более сложна и имеет меньшее влияние, поэтому в этой статье не учитывается.

Рис. 1. Слева: схема зондирования морской поверхности; справа: сравнение корреляционной функции для смоделированного волнения (маркированная линия) и аналитического выражения корреляционной функции для одномерного аналога формулы (1) (сплошная линия)

Приведём порядок вычисления геометрических модуляций. Для каждой пространственной точки в каждый момент времени вычисляются локальные углы скольжения по формуле: $\beta(r, \varphi, t) = \arctg \left[\frac{r}{H - \zeta(r, \varphi, t)} \right]$. Далее, для каждого фиксированного направления φ' и момента времени t' , для каждой дальностной точки r_i проверяется условие затенения (см. рис. 1 слева):

$$\beta(r_k, \varphi', t') \leq \beta(r_i, \varphi', t'), \quad \forall k: i < k \leq N_r.$$

Если для некоторой точки r_k это условие выполнено, значит, точка $\zeta(r, \varphi, t)$ затенена точкой $\zeta(r_i, \varphi, t)$. Введём характеристическую функцию области затенений:

$$\chi(r, \varphi, t) = \begin{cases} 1, & \text{если точка } \zeta(r, \varphi, t) \text{ затенена;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Соответственно, характеристическая функция освещённости: $\kappa = 1 - \chi$. Применяя маску затенений к карте возвышений, получаем: $\sigma_r^{sh}(r, \varphi, t) = \zeta(r, \varphi, t) \cdot \kappa(r, \varphi, t)$.

Для учёта модуляции уклонами волн необходимо произвести интерполяцию всего массива $\sigma_r^{sh}(r, \varphi, t)$ на регулярную декартову сетку. Шаг сетки необходимо выбирать так, чтобы получилось 2^n точек по x и y . Далее, для точек регулярной декартовой сетки вычисляются производные ζ_x и ζ_y . Модуляция уклонами волн совместно с затенениями определяется следующим образом:

$$\sigma^{tilt+sh.}(x, y, t) = \begin{cases} (\vec{n}, \vec{u}), & \text{если } (\vec{n}, \vec{u}) > 0 \text{ и } \kappa = 1; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Здесь $(\vec{\bullet}, \vec{\bullet})$ – скалярное произведение в трёхмерном евклидовом пространстве, $\vec{n}$ – вектор

единичной внешней нормали к поверхности ζ в точке (x, y, t) : $\vec{n}(x, y, t) = \frac{1}{|\vec{\rho}_x \times \vec{\rho}_y|} \vec{\rho}_x \times \vec{\rho}_y$,

где $\vec{\rho}_x = (1, 0, \zeta_x)$, а $\vec{\rho}_y = (1, 0, \zeta_y)$, $\vec{u}$ – единичный вектор, выходящий из точки $\zeta(x, y, t)$, направленный на локатор.

Далее, к изображению добавляется спекл-шум. Если обозначить двухмерную матрицу эффективного сигнала (срез по времени) за I (см. разрез на рис. 2б), то зашумлённое изображение вычисляется как $I_{noise} = (I + c)(1 + B)$. Здесь B – реализация случайного двухмерного гауссова шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $2 \cdot H_s \cdot 10^{-2}$ (H_s – значительная высота волнения), а c – некоторая положительная константа (в статье используется $c = 0,2$). Добавление отступа необходимо для того, чтобы шум воздействовал не только на сигнал от волн, но и на затенённые области, которые изначально заполнены нулями. Отметим, что в силу структуры выражения для зашумлённого изображения, отрицательные значения крайне маловероятны, поскольку второй сомножитель в правой части почти наверняка положителен. Чтобы исключить маловероятные отрицательные точки, производится поиск отрицательных значений, и, если таковые значения

находятся, то они заменяются на c . Выбор дисперсии шума производился по визуальному соответствию уровня шума реальной и смоделированной панорамы. Но для конкретного приложения точное значение уровня «сигнал/шум» неважно, поскольку в процессе обработки применяется фильтр дисперсионного соотношения, который удаляет большую часть шума. Сравнение разреза по дальности для реальной и смоделированной панорамы приведено на *рис. 2*. Последовательность применения всех перечисленных модуляций изображена на *рис. 3*.

Рис. 2. Пример разреза по дальности а) для реальной панорамы, б) для смоделированного РЛ-изображения (только модуляция затенениями и уклонами волн), в) то же, что и б) с добавлением мультипликативного шума

Рис. 3. Этапы моделирования взволнованной морской поверхности: а) фрагмент изображения взволнованной морской поверхности с параметрами $H_s = 3\text{ м}$, $\lambda_p = 109,5$ на полярной сетке с выделенной внутри областью для интерполяции, высота установки локатора 20 м; б) маска затенений для выделенной прямоугольной области (вероятность затенений 80%); в) результат применения к исходному изображению совместно модуляций затенениями и уклонами волн; г) добавлен мультипликативный спекл-шум

Обработка данных

Для выделения модуляции сигнала крупными волнами на фоне помех используется процедура фильтрации набора радарных изображений в частотной области. Обозначим основные шаги.

1. Из каждого радарного изображения выделяется квадрат со стороной 0,5 км, производится интерполяция данных на регулярную декартову сетку, связанную с этим квадратом. Получается трёхмерный массив $I(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_m, t_1 \dots t_k)$ размером $256 \times 256 \times 82$ точки.
2. К массиву I применяется процедура трёхмерного быстрого дискретного преобразования Фурье, получается массив $S_I^3(\vec{k}, \omega)$ (здесь и далее верхний индекс относится к размерности массива). Чтобы нивелировать эффект наложения сигнала, область $\omega < 0$ копируется и восстанавливается выше частоты Найквиста, область $k_x < 0$ заполняется нулями.
3. Проводится вычисление компонент скорости приповерхностного течения (U_x, U_y) (Nieto Borge, Soares, 2000).
4. С помощью известного сдвига частоты, соответствующего течению, производится фильтрация сигнала волн и высших гармоник от шума:

$$\chi_{sp}^q = \begin{cases} 1, & \text{если } \left| \omega(k_{x_i}, k_{y_j}) - (q+1) \sqrt{\frac{g|k_{x_i}, k_{y_j}|}{q+1}} \operatorname{th} \left(\frac{|k_{x_i}, k_{y_j}| d}{q+1} \right) - k_{x_i} U_x - k_{y_j} U_y \right| \leq \Delta f \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где Δf – частотный зазор (0,1–0,15 рад/с), $q=1,2,\dots$ соответствует номеру высшей гармоники, $q=0$ соответствует сигналу от волн. На радарных спектрах хорошо различимы гармоники для $q=0,1$ (см. рис. 4а).

5. Для целей обращения радарных изображений нужно отфильтровать спектр следующим образом: $S_{Fil}^3 = S_I^3 \cdot \chi_{sp}^0$.

Модуляционно-передаточная функция

Следуя работе (Nieto Borge et al., 2004), определим эмпирическую модуляционно-передаточную функцию (МПФ) для спектральной амплитуды как

$$MTF(\vec{k}) = \frac{S_{radar}^1 \cdot \max(S_{measured}^1)}{\max(S_{radar}^1) \cdot S_{measured}^1}, \quad \text{где} \quad S_{radar}^1(k) = \int_0^{2\omega_N} \int_0^\pi S_{Fil}^3(k(k, \theta), \omega) \cdot k \, d\theta \, d\omega.$$

Обозначение $\vec{k}(k, \theta)$ подразумевает, что интеграл берётся от значений спектра, интерполированных на полярную сетку $(|k|, \theta)$, а множитель k – это якобиан преобразования декартовых координат в полярные, ω_N – частота Найквиста. В качестве $S_{measured}^1$ можно

использовать одномерный спектр от волновых чисел, полученный из данных натурных наблюдений, тогда $S_{measured}^1(k) = S_{measured}^1(\omega(k)) \frac{d\omega}{dk}$. Последнее равенство можно использовать, когда известно дисперсионное соотношение для волн. В случае численного моделирования используется изначальный волновой спектр JONSWAP с соответствующими волновыми параметрами (рис. 4б). В ходе серии численных экспериментов была получена оценка $MTF(\vec{k}) = |k|^{-1,2}$. Восстановленный спектр волнения получается из фильтрованного спектра РЛ-изображения следующим образом: $S_W^3(\vec{k}, \omega) = S_{Fil}^3(\vec{k}, \omega) \cdot MTF(\vec{k})$.

Помимо модуля комплексных компонент спектра основные механизмы модулируют также и его аргумент, однако это учитывается апостериори, после применения процедуры обратного преобразования Фурье. Смысл этой модуляции заключается в том, что при используемом подходе к моделированию максимальная интенсивность принятого радиолокационного сигнала приходится не на точку вершины гребня волны, а на её передний склон, в силу чего восстановленная волна нуждается в корректировке её фазы.

Рис. 4. а) Осреднённый по углу трёхмерный спектр модуляций РЛ-сигнала, полученный из данных численного моделирования, отчётливо видны нулевая и первая гармоники; б) одномерный фильтрованный спектр модуляций (синяя сплошная линия), тот же спектр после применения модуляционно-передаточной функции (1) (чёрная сплошная линия) и изначальный спектр JONSWAP (красная пунктирная линия), нормированные на их максимальные значения

Следующим шагом в процедуре обращения изображения является применение процедуры обратного преобразования Фурье к массиву $S_W^3(\vec{k}, \omega)$ и взятие действительной части $\tilde{\eta}(x, y, t) = \text{Re}(\text{IFFT}(S_W^3(\vec{k}, \omega)))$ (массив восстановленных возвышений размером $256 \times 256 \times 82$ точки). Далее, карты относительных возвышений необходимо откалибровать на значительную высоту волнения H_s , полученную из РЛ или других независимых измерений $\eta(x, y, t) = \tilde{\eta}(x, y, t) \frac{H_s}{\sigma_{\tilde{\eta}}}$ ($\sigma_{\tilde{\eta}}$ – дисперсия высот поверхности $\tilde{\eta}$). Восстановленная волна будет иметь систематический сдвиг фазы $\Delta\varphi$ (см. табл. 2). Результаты применения

описанной технологии для синтетических и натурных данных приведены на *рис. 5, 6*, статистические параметры сравнения приведены в *табл. 2*.

Рис. 5. Сравнение (на разрезе по дальности) смоделированного (пунктирная линия) и восстановленного после модуляции (сплошная линия) волнового поля для значительной высоты волнения: а) 1 м, б) 2 м, в) 3 м, г) 4 м

Таблица 2. Статистические характеристики сравнения

H_s , м	$\Delta\varphi$, м	На разрезе (рис. 5)		По карте	
		Средняя ошибка, м	Коэффициент корреляции	Средняя ошибка, м	Дисперсия ошибки, м
1	7,8	0,17	0,72	0,1482	0,0212
2	9,8	0,23	0,78	0,2969	0,0488
3	9,8	0,39	0,77	0,4418	0,0816
4	9,8	0,56	0,78	0,6289	0,1182

Заключение

Представлены первые результаты применения техники обращения РЛИ в карты возвышений взволнованной морской поверхности. Верификация метода проведена с привлечением стохастического моделирования взволнованной морской поверхности. Оценка разности изначального и восстановленного волнового поля даёт средний по карте результат ошибки на уровне 15% значительной высоты волнения.

Рис. 6. а) Пример радиояркостного изображения, полученного во время шторма 27.09.2013 в Голубой бухте г. Геленджик; б) спектр, полученный из обработки серии из 81 изображения; в) карта возвышений морской поверхности, соответствующая РЛ-панораме а); г) вертикальный разрез, соответствующий чёрному отрезку на карте в)

Представленная техника может успешно применяться в различных приложениях, где необходима информация о возвышении взволнованной морской поверхности до значительных высот волнения 3–3,5 м.

Одним из важных элементов техники обращения является применение модуляционно-передаточной функции для амплитуды принятого сигнала. В ходе серии численных экспериментов для малых углов скольжения была установлена надёжность оценки МПФ функцией $|k|^{-1,2}$.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-05-31529 и РНФ №14-50-00095.

Литература

1. Dankert H., Horstmann J., Rosenthal W. Ocean wind fields retrieved from radar-image sequences // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108. No. C11. 3352.
2. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E., Carlson H., Cartwright D., Enke K., Ewing J., Gienapp H., Hasselmann D., Kruseman P., Meerburg A., Muller P., Olbers D., Richter K., Sell W., Walden H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Deutsches Hydrographisches Institut, 1973. 95 p.

3. Kanevsky M.B. Radar imaging of the ocean waves. Elsevier. 2008. 195 p.
4. Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Ohkusu M., Honda T., Rikiishi K. Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy // *Journal of Physical Oceanography*. 1975. Vol. 5. P. 750–760.
5. Nieto Borge J.C., Hessner K., Jarabo-Amores P., De La Mata-Moya D. Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series // *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2008. Vol. 2. P. 35–41.
6. Nieto Borge J.C., Reichert K., Dittmer J. Use of nautical radar as a wave monitoring instruments // *Coastal Engineering*. 1999. Vol. 37. P. 331–342.
7. Nieto-Borge J.C., Rodriguez G.R., Hessner K., Gonzalez P.I. Inversion of marine radar images for surface wave analysis // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2004. Vol. 21. P. 1291–1300.
8. Nieto Borge J.C., Soares G. Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar // *Coastal Engineering*. 2000. Vol. 40. P. 375–391.
9. Salcedo-Sanz S., Nieto Borge J.C., Carro-Calvo L., Cuadra L., Hessner K., Alexandre E. Significant wave height estimation using SVR algorithms and shadowing information from simulated and real measured X-band radar images of the sea surface // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 101. P. 244–253.
10. Serafino F., Lugni C., Nieto Borge J.C., Zamparelli V., Soldovieri F. Bathymetry determination via X-band radar data: A new strategy and numerical results // *Sensors*. 2010. Vol. 10. P. 6522–6534.

Accuracy analysis of individual waves retrieval from X-band nautical radar data by means of stochastic modeling of sea clutter images

P.V. Chernyshov¹, D.V. Ivonin¹, S.A. Myslenkov², Z.A. Khalikov¹

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*

E-mail: pavel_chv89@mail.ru

²*Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

This work is dedicated to the problem of inversion of X-band radar rough sea surface intensity images to surface elevation maps. The technique is based on the implementation of dispersion relation shell filter and high-pass filter to the complex 3D spectra of radar images' sequence. The method includes also application of empirical modulation transfer function for amplitudes and phases of complex spectral components. Such technique is applied to north-eastern part of the Black sea (Southern branch of SIO RAS) radar data for the first time. Validation of the method was implemented with series of stochastic experiments. Each experiment included modeling of rough sea surface with consequent application of main imaging mechanisms. For grazing incidence tilt modulation and shadowing mechanisms were used. Multiplicative Gaussian noise was also added to the radar images' model. Comparison between modeled data and data reconstructed after modulations gives averaged accuracy around 15% of the significant wave height.

Keywords: X-band radar, coastal zone, individual waves retrieval

Accepted: 05.08.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-68-78

References

1. Dankert H., Horstmann J., Rosenthal W., Ocean wind fields retrieved from radar-image sequences, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. C11, 3352.
2. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E., Carlson H., Cartwright D., Enke K., Ewing J., Gienapp H., Hasselmann D., Kruseman P., Meerburg A., Muller P., Olbers D., Richter K., Sell W., Walden H., Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deutsches Hydrographisches Institut*, 1973, 95 p.
3. Kanevsky M.B., Radar imaging of the ocean waves, *Elsevier*, 2008, 195 p.
4. Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Ohkusu M., Honda T., Rikiishi K., Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy, *Journal of Physical Oceanography*, 1975, Vol. 5, pp. 750–760.

5. Nieto Borge J.C., Hessner K., Jarabo-Amores P., De La Mata-Moya D., Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series, *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2008, Vol. 2, pp. 35–41.
6. Nieto Borge J.C., Reichert K., Dittmer J., Use of nautical radar as a wave monitoring instruments, *Coastal Engineering*, 1999, Vol. 37, pp. 331–342.
7. Nieto Borge J.C., Rodriguez G.R., Hessner K., Gonzalez P.I., Inversion of marine radar images for surface wave analysis, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, Vol. 21, pp. 1291–1300.
8. Nieto Borge J.C., Soares G., Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar, *Coastal Engineering*, 2000, Vol. 40, pp. 375–391.
9. Salcedo-Sanz S., Nieto Borge J.C., Carro-Calvo L., Cuadra L., Hessner K., Alexandre E., Significant wave height estimation using SVR algorithms and shadowing information from simulated and real measured X-band radar images of the sea surface, *Ocean Engineering*, 2015, Vol. 101, pp. 244–253.
10. Serafino F., Lugni C., Nieto Borge J.C., Zamparelli V., Soldovieri F., Bathymetry determination via X-band radar data: A new strategy and numerical results, *Sensors*, 2010, Vol. 10, pp. 6522–6534.