Метод восстановления вертикального профиля течения и его верификация по модельным данным СВЧ-радиолокатора

П.В. Чернышов

Тель-Авивский университет, Тель-Авив, Израиль

E-mail: pavelc@mail.tau.ac.il

Рассматривается обратная задача восстановления вертикального профиля течения по модельным данным некогерентного СВЧ-радиолокатора. Предложен алгоритм на основе дисперсионного соотношения, учитывающего вертикальную неоднородность течения и эффект конечной глубины, получающегося из возмущенного решения уравнения Рэлея (Skor, 1987). Обращение профиля производится с помощью решения соответствующей регуляризованной оптимизационной задачи. Радиолокационные данные измерений эмпирического дисперсионного соотношения приближаются выражением Скопа, в котором интегрирование взвешенного профиля вертикального течения по глубине производится приближенно по формуле трапеций. После применения метода наименьших квадратов получается переопределенная система линейных алгебраических уравнений на значения скорости вертикального течения в узлах интегрирования. Регуляризация задачи проводится методом Лагранжа. Для тестирования метода в качестве начальных данных для эмпирического дисперсионного соотношения использовались как точное решение Скопа для дисперсионной кривой, возмущенное добавлением белого шума с различной интенсивностью, так и дисперсионные кривые, восстановленные из спектров синтетических РЛ-изображений. Радиолокационные изображения вычислялись на основе реализации пространственно-временной диаграммы возвышений взволнованной поверхности с дисперсионным соотношением Скопа с последующим применением основных изображающих механизмов для скользящего зондирования (модуляции затенениями, уклонами волн, спекл-шум). Результаты численных экспериментов показывают надежность предложенного метода для восстановления вертикального профиля течения.

Ключевые слова: СВЧ-радиолокатор, восстановление вертикального профиля течения, регуляризация

Одобрена к печати: 15.09.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-56-66

Введение

Измерения вертикальной структуры течений в глубоководных районах океана и в прибрежной зоне являются нетривиальной теоретической задачей, крайне важной в приложениях. Верхний слой вертикального профиля течения имеет большое значение для турбулентного перемешивания и обмена энергии и массы в системе вода-воздух (Schumann, Gerz, 1995), в то время как нижний слой важен для оценки диссипации волн и оценки переноса донных осадков (Zitman, 2006).

До сих пор было сделано несколько частично успешных попыток восстановления вертикального профиля с помощью высокочастотных (ВЧ) радаров (Ha, 1979; Ivonin et al., 2004). Основным ограничением для этих радаров стало обстоятельство, что они позволяют получать лишь несколько точек данных (2–4), используя либо опцию многочастотности, либо старшие (кратные брэгговским) пики доплеровского спектра. Морские навигационные СВЧ-радары имеют несколько преимуществ. Одно из них состоит в возможности измерения РЛ-панорамы по пространству и по времени, что позволяет проводить трехмерный анализ Фурье (два волновых числа и частота) с достаточно подробным разрешением, т.е. с приемлемой точностью определять сдвиг частоты, связанный с наличием вертикально-неоднородного течения для довольно широкого диапазона волновых чисел. В работе (Lund et al., 2015) впервые была предложена методика использования данных СВЧ-радиолокатора

для оценки вертикальной структуры течения, однако сам метод обращения в статье не приводится.

Поток под волнами над вертикально неоднородным течением является вихревым и зависит от текущего профиля, поэтому для получения дисперсионного соотношения требуется решить уравнения Рэлея (Shrira, 1993), точное аналитическое решение которого существует только для набора очень простых профилей: линейный, тригонометрический, экспоненциальный и т.п. (Drazin, Howard, 1966). В общем же случае строятся решения теории возмущений, предполагающие малость кривизны профиля и/или величины сдвига течения. В работе (Stewart, Joy, 1974) было получено возмущенное решение первого порядка точности по малому параметру $\varepsilon = U_0 / (c_0 k^2 H^2)$ (U_0 — характерная скорость на поверхности) в предположении глубокого слоя жидкости: U

$$c = c_0 + 2k \int_0^\infty U(z) e^{-2kz} dz. \quad (1)$$

Далее в статье (Skor, 1987) предыдущий результат был уточнен для случая конечной глубины:

$$c = c_0 + \frac{2k}{1 - e^{-4kH}} \left[\int_0^H U(z) e^{-2kz} dz + e^{-4kH} \int_0^H U(z) e^{2kz} dz \right], \quad (2)$$

где $c_0 = \sqrt{(g \tanh(kH)) / k}$. Формулу (2) можно использовать, если $|U - \bar{U}| \ll \sqrt{gH}$, где $\bar{U}$ — осредненная по глубине скорость течения. Решение (1) может быть получено из выражения (2) устремлением глубины к бесконечности.

Метод восстановления вертикального профиля течения

Для восстановления вертикального профиля течения необходимо выполнить обращение интегралов в формуле (2). Выполним интегрирование с помощью формулы трапеций для регулярной сетки по глубине с шагом Δz , что будет соответствовать кусочно-линейной аппроксимации профиля $U(z)$ (рис. 1).

$$c_d = c_0 + \frac{k \Delta z}{1 - e^{-4kH}} \left[\sum_{i=1}^{N-1} (U_i e^{-2kz_i} + U_{i+1} e^{-2kz_{i+1}}) + e^{-4kH} \sum_{i=1}^{N-1} (U_i e^{2kz_i} + U_{i+1} e^{2kz_{i+1}}) \right]. \quad (3)$$

Погрешность оценки каждого из интегралов вычисляется по известной формуле $|E| \leq \frac{H^3}{12N^2} \max_{z \in [0, H]} f''(z)$ и может быть сделана достаточно малой. Далее необходимо подобрать компоненты профиля U_i таким образом, чтобы наиболее точно приблизить (в смысле наименьших квадратов) значение выражения (3) к данным. Таким образом, получается

отделить количество точек данных $c(k_j), j = 1, \dots, N_k$ от количества точек интегрирования N . Большое количество точек сетки увеличивает размерность задачи, но также позволяет выполнять интегрирование с любой необходимой точностью.

Рис. 1. Геометрия задачи: пунктирная линия — непрерывный профиль течения, сплошная ломаная — кусочно-линейное приближение, $U_1, U_2, \dots$ — значения сдвига скорости в узлах интегрирования $z_1, z_2, \dots$

В соответствии с общим подходом нелинейного метода наименьших квадратов определим следующий функционал, зависящий от вектора значений скоростей на соответствующих глубинах $\mathbf{U} = (U_1, \dots, U_N)^T$:

$$F(\mathbf{U}) = \sum_{j=1}^{N_k} (c(k_j) - c_d(k_j, \mathbf{U}))^2, \quad (4)$$

где $c(k_j)$ — это данные измерений, соответствующие точкам k_j . Таким образом, чтобы минимизировать функционал (4) необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_k} (c(k_j) - c_d(k_j, \mathbf{U})) \frac{\partial c_d(k_j, \mathbf{U})}{\partial U_m} = 0, & m = 1, \dots, N, \\ \frac{\partial c_d(k_j, \mathbf{U})}{\partial U_m} = \frac{\Pi_N(m) \Delta z k_j \operatorname{ch}(2k_j(H - z_m))}{\operatorname{sh}(2k_j H)}, \end{cases} \quad (5)$$

$\Pi_N(m) = \theta(m - 2) - \theta(m - N + 1) + 1$, $m = 1, \dots, N$ ($\theta(m)$ — дискретная функция Хэвисайда), или в матричной форме:

$$A\mathbf{U} = \mathbf{b}, \quad (6)$$

где A — это матрица размера $N \times N$ с элементами:

$$\left. \begin{aligned} A_{mn} &= \Pi_N(m) \Pi_N(n) \Delta z^2 \sum_{j=1}^{N_k} \frac{k_j^2 \operatorname{ch}(2k_j(H - z_n)) \operatorname{ch}(2k_j(H - z_m))}{\operatorname{sh}^2(2k_j H)}, \\ m &= 1, \dots, N; \quad n = 1, \dots, N, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$a) \quad b_m = \Pi_N(m) \Delta z \sum_{j=1}^{N_k} (\Delta c(k_j)) \frac{k_j ch(2k_j(H - z_m))}{sh(2k_j H)}, \quad m = 1, \dots, N, \quad \Delta c(k_j) = c(k_j) - c_0(k_j).$$

Необходимо отметить, что при использовании другой аппроксимации интеграла, более высокого порядка, задача минимизации (5) уже не будет сводиться к линейной системе уравнений. К сожалению, у системы (6) с матрицей (7) не существует единственного решения, поскольку нарушаются условия теоремы Кронекера-Капелли, однако можно искать псевдорешение.

В качестве тестового численного эксперимента было проведено восстановление вектора $\mathbf{U}$ для данных, соответствующих выражению (5) с аналитическим интегрированием для формул профилей из *табл. 1* для 199 точек $k_j \in [0, 01, 2]$ рад/м, т.е. в качестве входных данных $c(k_j)$ было использовано точное аналитическое выражение (2) для конкретного профиля скорости без аппроксимации интеграла. Дисперсия модуля ошибки восстановления фазовой скорости $|c(k_j) - c_d(k_j, U^*)|$ во всех экспериментах была порядка 10^{-9} , другие результаты сравнения приведены в *табл. 2*.

Таблица 1. Формулы для использованных в статье профилей

Профиль		Формула
номер	название	
1	Линейный	$U_0 \left(\frac{-1}{H} z + 1 \right)$
2	Тригонометрический	$U_0 \cos \left(\frac{\pi z}{2H} \right)$
3	Экспоненциальный	$U_0 e^{\beta z} \quad (\beta < 0)$
4	Параболический	$-U_0 \left(\frac{1}{H^2} z^2 - 1 \right)$

Таблица 2. Результаты тестового эксперимента

№ профиля	$\max_i U_i - U_i^* $	$\max_i U_i - U_i^* $ после СГ-фильтра
1	0,0262	$6,9 \cdot 10^{-4}$
2	0,0255	0,0026
3	0,0273	0,0112
4	0,0251	0,0035

Для устранения осцилляций, возникающих из-за использования псевдорешения, полученные результаты фильтруются при помощи линейного фильтра Савицкого-Голея (СГ) с достаточно широким окном (Savitzky, Golay, 1964). Как видно из сравнения, приведенного в *табл. 2*, метод хорошо работает для невозмущенных данных. Однако, как и многие обратные задачи, задача восстановления вертикального профиля течения $U(z)$ является некорректной

и добавление даже небольшого шума в данные может сильно влиять на решение, что приводит к необходимости ввести регуляризацию.

Регуляризация

Для регуляризации используется следующее соображение: пусть точное решение обратной задачи U^* , тогда величина AU^* близка к правой части b в смысле наименьших квадратов, и в то же время отклонение U^* от некоторого начального приближения U^0 мало, т.е. задача (4) может быть заменена задачей минимизации для функционала:

$$Q(U) = \sum_i \left(\sum_j A_{ij} U_j - b_i \right)^2 + \lambda \sum_j (U_j - U_j^0)^2, \quad (8)$$

где λ — множитель Лагранжа. В матричном виде задача (11) эквивалентна системе уравнений:

$$(A^T A + \lambda I)U = A^T b + \lambda U^0, \quad (9)$$

где I — единичная матрица. Множитель λ имеет смысл регулятора. Если $\lambda > 1$, то $U \rightarrow U^0$, если же $\lambda \rightarrow 0$, то $(U \rightarrow U^*)$. Однако даже при очень малых значениях параметра λ ($10^{-7} \dots 10^{-10}$) решение задачи (9) практически не отличается от решения задачи (6), но при этом решается проблема ее переопределенности.

Вторая серия численных экспериментов была посвящена сравнению устойчивости регуляризованного и метода без регуляризации к добавлению белого шума с различной дисперсией. Графические результаты сравнения приведены на рис. 2. Параметры численного эксперимента помещены в табл. 3.

Рис. 2. Примеры восстановления для линейного профиля $U(z) = -0,007z + 0,2$ с гауссовым шумом в начальных данных (дисперсия шума указана на рисунках как σ_{noise}); красная сплошная линия — точное решение, черная пунктирная линия — профиль, восстановленный с помощью оптимизационной процедуры с применением регуляризации и без нее

Таблица 3. Параметры численного эксперимента ($N_k = 199$, $N = 400$)

Номер профиля	σ_{noise}	Дисперсия $ c(k_j) - c_d(k_j, U^*) $	$\max_i U_i - U_i^* $
без регуляризации			
1	10^{-6}	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0,1532
1	10^{-5}	$3,4 \cdot 10^{-6}$	0,4733
регуляризованный метод			
1	10^{-4}	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,0039
1	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,0101
3	10^{-4}	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,0301
3	10^{-3}	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,0372

Применение регуляризованного метода восстановления вертикального профиля течений к синтетическим данным СВЧ-радиолокатора

Чтобы оценить возможности предложенного метода для работы с реальными РЛ-данными, проведем верификацию метода на примере модельных данных СВЧ-радиолокатора. Для простоты, как и в предыдущем изложении, будем рассматривать одномерный случай. Моделирование временной серии одномерных яркостных изображений СВЧ-радиолокатора начинается с моделирования взволнованной морской поверхности. Ограничиваясь лишь линейной теорией, морскую поверхность можно представить как сумму M гармоник:

$$\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^M A_i \cos(k_i(c_i t + x) + \varphi_i),$$

где k_i — волновые числа; φ_i — равномерно распределенные случайные фазы; c_i — фазовые скорости, полученные точным интегрированием профиля по формуле (2). Амплитуды $A_i = \sqrt{2S_{k_i} \Delta k}$ определяются из спектра JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) с параметром пиковатости $\gamma = 3,3$, Δk — интервал дискретизации по волновому числу. Параметры численного моделирования взволнованной морской поверхности приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры численного моделирования взволнованной морской поверхности

Параметр	Значение
Δk ($k \in [0,01, 3]$ рад/м)	0,01 рад/м
Количество шагов по модулю волнового вектора M	299
Шаг по дальностной координате	2 м
Шаг по времени	2 с
Количество шагов по времени	1024

Ограничимся случаем прибрежного зондирования низко установленным радиолокатором (высота установки 10...20 м) дальностей 1...3 км. При таких условиях основными механизмами формирования радиолокационного изображения являются модуляции затенениями и уклонами волн (Nieto Borge et al., 2004). Техника применения указанных модуляций к синтетическим данным также подробно описана в работе (Чернышов и др., 2016).

Совместная модуляция затенениями и уклонами волн для точки (x_i, t_j) определяется следующим образом:

$$\sigma^{tilt+sh.}(x_{ij}, t) = \begin{cases} (\mathbf{n}, \mathbf{u}), & \text{если } (\mathbf{n}, \mathbf{u}) > 0 \text{ и } \zeta(x_{ij}, t) \text{ не затенена;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

здесь $\mathbf{n}$ — вектор единичной внешней нормали к поверхности ζ в точке (x_i, t_j) ; $\mathbf{u}$ — единичный вектор, выходящий из точки $\zeta(x_i, t_j)$, направленный на локатор. Затенения вычисляются с использованием простого критерия, основанного на сравнении локальных углов падения во всех парах точек, вторая из которых всегда дальше первой.

Обработка данных

Для выделения положения точек дисперсионной кривой на двухмерном (k, ω) -фурье-спектре РЛ-изображения и восстановления вертикального профиля течения применяется следующие шаги:

1. По выделенному участку массива $\sigma^{tilt+sh.}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_m)$ проводится вычисление двухмерного спектра мощности модуляций РЛ-сигнала морской поверхностью. Полученный результат спектральной мощности выражается в децибелах и записывается в массив $S^2(k, \omega)$ (верхний индекс обозначает размерность массива). Для уменьшения концевых эффектов к массиву предварительно применяется симметричное окно Ханнинга размера $n \times m$. Для учета возможного эффекта наложения спектра (альясинга) область $\omega < 0$ вырезается и восстанавливается выше частоты Найквиста.

2. Применения фильтра мощности:

$$S_{\alpha}^2(k, \omega) = \begin{cases} S^2(k, \omega), & \text{если } S^2(k, \omega) \geq \alpha \cdot \max_{(k, \omega)} (S^2(k, \omega)); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3. Выделяем точки с максимальной энергией в окрестности дисперсионной кривой, которая учитывает сдвиг на среднюю скорость поверхностного течения (можно использовать, например, метод оценки из статьи (Shen et al., 2015)) и конечную глубину (Serafino et al., 2010). Определим множество

$$\Omega_{ij} = \left\{ j \mid \sqrt{gk_i \operatorname{th}(k_i H)} + k_i \bar{U} - a \leq \omega_j \leq \sqrt{gk_i \operatorname{th}(k_i H)} + k_i \bar{U} + b \right\},$$

где константы a и b , соответствующие величине сдвига от тестовой дисперсионной кривой вниз и вверх, определяются в каждом случае индивидуально. Выделение точек дисперсионного соотношения произведем согласно следующей процедуре:

$$\omega(k_i) = \arg \max_{j \in \Omega_{ij}} S_{\alpha}^2(k_i, \omega_j).$$

4. Решение задачи (9) для восстановления вертикального профиля с данными $c(k_i) = \omega(k_i)/k_i$, $i = 1, \dots, N_k$.

Результаты сравнения точности восстановления для линейного и экспоненциального профиля приведены в табл. 5. Пример применения процедуры выделения точек дисперсионной кривой в спектральной области приведен на рис. 3.

Рис. 3. Пример восстановления линейного профиля течения из синтетических данных радиолокатора. Слева сверху: двухмерный спектр мощности модуляций РЛ-сигнала моделированной морской поверхностью; справа сверху: тот же спектр после устранения эффекта наложения спектра и применения фильтра мощности ($\alpha = 0,5$), синяя кривая — дисперсионное соотношение $\omega = \sqrt{gk}$, черная кривая $\omega = \sqrt{gk} + kU_0$, красная кривая — точное решение Скопа; слева внизу: разность между восстановленными и точными данными о сдвиге частоты; справа внизу: сравнение изначального (красная линия) и восстановленного (черная линия) профиля

Таблица 5. Параметры численного эксперимента по восстановлению линейного и экспоненциального профиля течения с использованием синтетических данных радиолокатора

Номер профиля	N/N_k	λ	$\max_i U_i - U_i^* $	$\text{mean}_i U_i - U_i^* $
1	400/81	10^{-6}	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
3	400/199	10^{-9}	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$

Заключение

Разработан и протестирован алгоритм восстановления вертикального профиля течения для данных некогерентного СВЧ-радиолокатора. Верификация проведена на наборе синтетических радиолокационных данных, смоделированных с учетом вертикальной неоднородности течения. Для набора профилей, у которых возможно аналитическое интегрирование по глубине, метод показывает надежный результат восстановления изменения горизонтальной компоненты течения по глубине.

Основным преимуществом СВЧ-радиолокаторов по сравнению с ВЧ является возможность получения значительного количества точек данных ($O(100)$) для довольно широкого диапазона волновых чисел. Для этого необходимо длительное накопление данных по времени (более получаса) и, по возможности, лучшее разрешение по дальности (1...5 м). Без принципиальных изменений метод можно применять и для трехмерных данных, когда добавляется азимутальная координата.

Литература

1. Чернышов П.В., Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Халиков З.А. Анализ точности восстановления высот индивидуальных волн при измерении прибрежным СВЧ-радиолокатором по данным стохастического моделирования взволнованной морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 68–78.
2. Drazin P.G., Howard L.N. Hydrodynamic stability of parallel flow of inviscid fluid // Advances in applied mechanics. 1966. Vol. 9. P. 1–89.
3. 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.
4. Ha E.C. Remote sensing of ocean surface current and current shear by HF backscatter radar. Stanford University, 1979. 134 p.
5. Ivonin D.V., Broche P., Devenon J.L., Shrira V.I. Validation of HF radar probing of the vertical shear of surface currents by acoustic Doppler current profiler measurements // J. Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109. Issue C4. P. 1–8.
6. Lund B., Graber H. C., Tamura H., Collins C.O., Varlamov S.M. A new technique for the retrieval of near-surface vertical current shear from marine X-band radar images // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. Vol. 120. Issue 12. P. 8466–8486.
7. Nieto Borge J.C., Rodriguez G.R., Hessner K., Gonzalez P.I. Inversion of marine radar images for surface wave analysis // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2004. Vol. 21. P. 1291–1300.
8. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36. No. 8. P. 1627–1639.
9. Schumann U., Gerz T. Turbulent mixing in stably stratified shear flows // J. Applied Meteorology. 1995. Vol. 34. P. 33–48.
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.

11. Shen C., Huang W., Gill E.W., Carrasco R., Horstmann J. An algorithm for surface current retrieval from X-band marine radar images // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. Iss. 6. P. 7753–7767.
12. Shrira V.I. Surface waves on shear currents: solution of the boundary-value problem // *J. Fluid Mechanics*, 1993. Vol. 252. P. 565–584.
13. Skop R.A. An approach to the analysis of the interaction of surface waves with depth-varying current fields // *Applied mathematical modeling*. 1987. Vol. 11. No. 6. P. 432–437.
14. Stewart R.H., Joy J.W. HF radio measurements of surface currents // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1974. Vol. 21. No. 12. P. 1039–1049.
15. Zitman T.J. Effect of assuming a logarithmic flow profile near the bottom on computing tide-residual sediment transport // *Coastal Dynamics 2005: Proc. 5th Intern. Conf. April 4–8, 2005, Barcelona, Spain*. 2006. P. 1–12.

Method of shearing current profile reconstruction and its verification for synthetic X-Band radar data

P.V. Chernyshov

Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel
E-mail: pavelc@mail.tau.ac.il

The inverse problem of shearing current retrieval from X band radar intensity data is considered in this paper. An algorithm based on the dispersion relation which accounts for vertical inhomogeneity of horizontal current and finite water depth is presented. The dispersion relation is derived on the basis of the perturbation solution of Rayleigh equation (Skop, 1987). A profile inversion is performed accounting for the solution of the correspondent regularized optimization problem. The empirical dispersion curve derived from the Fourier analysis of the modeled radar data is fitted with the Skop's solution by approximate integration. After applying the least squares method one faces an overdetermined system of linear algebraic equations on the unknown values of the vertical current in the integration nodes. The regularization of the problem is made using a Lagrangian method. Several numerical experiments for the verification of the method were carried out. Firstly, the original Skop's solution in which analytical integration of the profile was used as initial phase velocity data. The second experiment used the same initial data contaminated with white noise of different intensities (both regularized and not-regularized methods were tested). The third set of experiments dealt with dispersion relation data retrieved from radar's synthetic images. These images were modeled on the basis of temporal sequences of the 1D surface elevation realizations, which employ Skop's dispersion relation for both linear and exponential profiles. Afterwards, main imaging mechanisms for grazing incidence probing were applied. The frequency shift due to the presence of sheared flow was determined in the wavenumber-frequency spectral domain. The comparison of original and retrieved data shows robustness of the proposed regularized inversion procedure.

Keywords: X-band radar, shearing current retrieval, regularization

Accepted: 15.09.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-56-66

References

1. Chernyshov P.V., Ivonin D.V., Myslenkov S.A., Khalikov Z.A., Analiz tochnosti vosstanovleniya visot individualnyh voln pri izmerenii pribrezhnym SVCh-radiolokatopom po dannym stohasticheskogo modelirovaniya vzvolnovannoy morskoy poverhnosti (Accuracy analysis of individual waves retrieval from X-band nautical radar data by means of stochastic modeling of sea clutter images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 68–78.
2. Drazin P.G., Howard L.N., Hydrodynamic stability of parallel flow of inviscid fluid, *Advances in applied mechanics*, 1966, Vol. 9, pp. 1–89.
3. 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.
4. Ha E.C., *Remote sensing of ocean surface current and current shear by HF backscatter radar*, Stanford University, 1979, 134 p.
5. Ivonin D.V., Broche P., Devenon J.L., Shrira V.I., Validation of HF radar probing of the vertical shear of surface currents by acoustic Doppler current profiler measurements, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, Vol. 109, Issue C4, pp. 1–8.

6. Lund B., Graber H.C., Tamura H., Collins C.O., Varlamov S.M., A new technique for the retrieval of near-surface vertical current shear from marine X-band radar images, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, Issue 12, pp. 8466–8486.
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. Savitzky A., Golay M.J.E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, 1964, Vol. 36, No. 8, pp. 1627–1639.
9. Schumann U., Gerz T., Turbulent mixing in stably stratified shear flows, *Journal of Applied Meteorology*, 1995, Vol. 34, pp. 33–48.
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.
11. Shen C., Huang W., Gill E.W., Carrasco R., Horstmann J., An algorithm for surface current retrieval from X-band marine radar images, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, Issue 6, pp. 7753–7767.
12. Shrira V.I., Surface waves on shear currents: solution of the boundary-value problem, *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, Vol. 252, pp. 565–584.
13. Skop R.A., An approach to the analysis of the interaction of surface waves with depth-varying current fields, *Applied mathematical modeling*, 1987, Vol. 11, No. 6, pp. 432–437.
14. Stewart R.H., Joy J.W., HF radio measurements of surface currents, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1974, Vol. 21, No. 12, pp. 1039–1049.
15. Zitman T.J., Effect of assuming a logarithmic flow profile near the bottom on computing tide-residual sediment transport, *Coastal Dynamics 2005. Proc. 5th International Conference*, April 4–8, 2005, Barcelona, Spain, 2006, pp. 1–12.