

Импульсный гидролокатор, предназначенный для восстановления параметров водной поверхности. Часть 1: Теоретические модели

К. А. Понур, Ю. А. Титченко, В. Ю. Караев, М. С. Рябкова

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: ponur@ipfran.ru*

Несмотря на то, что эксперимент представляет собой важнейший этап научного исследования при проверке выдвинутых гипотез и разработанных моделей, возможность проведения «численных» экспериментов значительно ускоряет процесс их верификации. Ещё более востребованным становится использование численного моделирования на этапе разработки, изготовления и тестирования нового прибора. Численный эксперимент позволяет оценить достоверность используемых теоретических моделей, точность алгоритмов обработки, определить оптимальную схему проведения измерений и в данном случае — параметры гидролокатора. Для получения новой информации о поверхностном волнении предлагается использовать многочастотный подводный акустический волнограф, и оценку его эффективности можно получить с помощью численного моделирования (численного эксперимента). Для описания формы отражённого импульса использовались две аналитические модели: модель Брауна и модель Караева. Впервые проведённое сравнение моделей продемонстрировало их различие для гидролокатора с широкой диаграммой направленности антенны. Существенная разница в поведении заднего фронта отражённого импульса связана с тем, что в модель Брауна не входит дисперсия уклонов рассеивающей поверхности. Впервые показано влияние длины волны излучения на форму отражённого импульса, что позволит использовать многочастотные системы для измерения интенсивности коротковолновой части спектра волнения.

Ключевые слова: квазизеркальное рассеяние, приближение Кирхгофа, рассеяние волн статистически шероховатой поверхностью, форма отражённого импульса, гидролокатор, высота значительного волнения, дисперсия уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной акустической волны волнения, алгоритмы обработки

Одобрена к печати: 03.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-49-58

Введение

Оперативному и глобальному мониторингу состояния поверхности Мирового океана уделяется большое внимание в связи с его значительным влиянием на климат Земли. Вывод измерительной аппаратуры в космос и совершенствующиеся методы обработки данных способны обеспечить решение этой задачи и позволят отслеживать процессы взаимодействия атмосферы и океана.

Для радиолокационного зондирования крайне большое значение имеют алгоритмы обработки, восстанавливающие интересующую учёных тематическую информацию, т. е. скорость и направление приводного ветра, высоту значительного волнения, дисперсию уклонов морской поверхности. Для валидации и верификации алгоритмов обработки радиолокационных данных, а также оценки их точности используются данные контактных измерений.

Основным источником данных контактных измерений выступают морские буи, которые измеряют скорость и направление приводного ветра, спектр длинных волн (>5 м) и высоту значительного волнения (Handbook..., 2009). В отличие от струнного или лазерного волнографа морские буи не требуют установки на морской платформе и могут быть размещены практически в любой точке Мирового океана.

Автономными приборами выступают акустические доплеровские измерители течения (ADCP, *англ.* Acoustic Doppler Current Profiler), однако они имеют такой недостаток, как низкое пространственное разрешение, составляющее около 5–6 м в зависимости от глубины погружения (Рябкова и др., 2020, 2021; Dally, Osiecki, 2004; Strong et al., 2000). В результате

информация о коротковолновой части спектра волнения (примерно от нескольких метров до нескольких сантиметров), которая наиболее чувствительна к скорости приводного ветра, не измеряется.

В связи с тем, что для радиолокационного зондирования Земли обычно используется сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон, коротковолновая часть спектра волнения оказывает наибольшее влияние на мощность отражённого сигнала. Поэтому расширение диапазона измеряемых из-под воды длин поверхностных волн с 5 м до нескольких сантиметров оказывается важной фундаментальной и прикладной задачей.

Разрабатываемый многочастотный подводный импульсный акустический волнограф будет способен решить эту задачу, и для оценки его потенциала на стадии разработки необходимо применение численного моделирования, что позволит проанализировать работоспособность алгоритмов в широком диапазоне изменения длины ветрового разгона и скорости приводного ветра, а также рассмотреть различные схемы измерения. При этом варьируются следующие параметры: глубина погружения, диаграмма направленности (ДН) антенны, длина волны гидролокатора, длительность импульса.

Данная статья (часть 1) посвящена обзору и сравнению существующих моделей отражённого водной поверхностью импульса при вертикальном зондировании. Для понимания различий далее будет приведено описание модели Брауна, формулы ICE (лёд) (Kouraev et al., 2011) и модели импульса Караева.

В части 2 (готовится к печати) статьи рассматривается численное моделирование метода измерения подводным акустическим гидролокатором и проведена оценка восстановления параметров морской поверхности по аналогии с используемыми в радиовысотометрии методами восстановления тематической информации (ретрекинга). Применяется новый подход к моделированию морской поверхности, позволяющий в результате численного эксперимента получить реально наблюдаемые эффекты.

Модель Брауна

Спутниковые радиовысотометры успешно применяются для измерения уровня морской поверхности и высоты значительного волнения (Chelton et al., 1989). Орбитальный радиовысотометр работает в импульсном режиме: излучает короткий импульс и принимает отражение. По переднему фронту отражённого импульса восстанавливается расстояние до морской поверхности и высота значительного волнения. Здесь и далее под отражённым импульсом подразумевается импульс, усреднённый по времени таким образом, чтобы он содержал информацию обо всей статистике водной поверхности и чтобы отсутствовали случайные всплески, связанные со случайной фазой отражённого водной поверхностью излучения.

Модель обратного рассеяния электромагнитного излучения СВЧ-диапазона морской поверхностью при малых углах падения в приближении метода Кирхгофа приобрела окончательный вид в 1970-е гг. (Басс, Фукс, 1972; Исакович, 1952; Varric, 1968). На её основе была построена модель для формы отражённого импульса, известная как модель Брауна (Brown, 1977).

В предположении гауссовости ординат подстилающей поверхности форма отражённого импульса описывается формулой Брауна:

$$P(t) = Ae^{-v} (1 + \operatorname{erf}(u)), \quad (1)$$

$$\text{где } A = A_0 \exp\left[-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi\right]; \quad u = \frac{t - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2\sigma_c^2}}; \quad v = \alpha \left(t - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2\right); \quad \alpha = \delta - \frac{\beta^2}{4}; \quad \delta = \frac{4}{\gamma} \cdot \frac{c}{h} \cos 2\xi;$$

$\beta = \frac{4}{\gamma} \sqrt{\frac{c}{h}} \sin 2\xi$; $\sigma_c^2 = \sigma_p^2 + \frac{\sigma_S^2}{c^2}$; $\sigma_p^2 = \frac{1}{\sqrt{2 \ln 2}} \tau_{imp}$; $\gamma = \frac{\ln 2}{2} \sin^2 \theta_{-3\text{дБ}}$; σ_S^2 — дисперсия ординат морского волнения; τ_{imp} — длительность излучённого импульса; ξ — малое отклонение антенны от надира; h — расстояние от фазового центра антенны до уровня невозмущённой поверх-

ности; c — фазовая скорость распространения излучения в среде (для спутникового высотомера равна скорости света в вакууме); $\theta_{-3\text{дБ}}$ — ширина ДН антенны на уровне -3 дБ.

Примеры формы отражённого импульса для орбитального радиовысотомера и подводного акустического гидролокатора, полученные по модели Брауна, приведены на *рис. 1*. Несмотря на то, что работа орбитальных радиовысотомеров обычно основана на излучении сигнала с линейной частотной модуляцией, после выполнения процедуры сжатия анализируют отражённый импульс, который мог бы быть получен излучением короткого прямоугольного импульса некоторой эффективной длительности, определяемой девиацией частоты. Эта процедура сжатия импульса позволяет добиться высокой точности орбитальных радиовысотомеров: 40 см по высоте волнения и 3 см по определению уровня воды. В подводной акустике для той же точности возможно сразу же излучать импульс необходимой длительности. Вычисления на *рис. 1* выполнены для высоты орбиты радиовысотомера 1000 км, диаграммы направленности антенны $1,5^\circ$, эффективной длительности импульса $\tau_{\text{imp}} = 3$ нс и подводного акустического высотомера, установленного на глубине $H = 30$ м, с диаграммой направленности антенны 30° и длительностью импульса $\tau = 40$ мкс. Вычисления выполнены для случая полностью развитого ветрового волнения (скорость ветра 10 м/с, высота значительного волнения 1,5 м). На рисунках время относительно излучённого импульса смещено на 2 ч/с. Время $t = 0$ на рисунках соответствует времени двойного хода луча до невозмущённой поверхности.

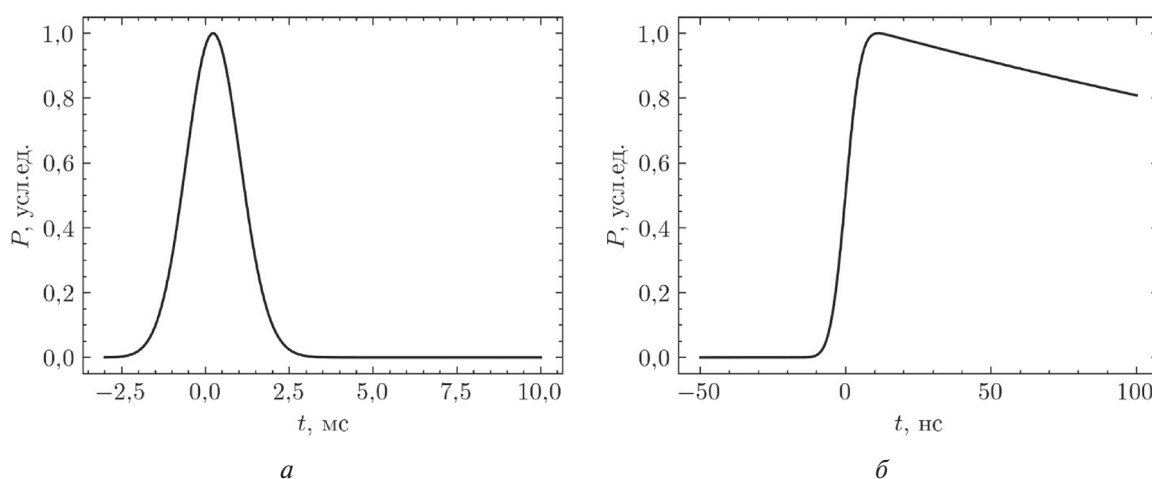


Рис. 1. Пример формы отражённого импульса акустического (а) и орбитального (б) радиовысотомера

Следует отметить, что для получения информации обо всей статистике водной поверхности в акустическом гидролокаторе из-за небольшой глубины необходимо усреднять отражённый импульс на протяжении достаточного времени, которое будет зависеть от интенсивности волнения. Случай работы радиовысотомера на небольшой высоте полёта без усреднения по времени рассмотрен в работах (Баскаков и др., 2017; Baskakov et al., 2021).

На *рис. 1* видно, что расстояние до рассеивающей поверхности оказывает сильное влияние на задний фронт отражённого импульса вследствие увеличения дальности хода при наклонном падении. Высотомер не принимает весь отражённый импульс из-за требования достичь оптимального объёма передаваемой на Землю информации. Полезная информация содержится только в переднем фронте отражённого импульса, небольшая часть заднего фронта сохраняется для контроля вертикальной ориентации антенны.

По форме отражённого импульса в радиовысотометрии определяют следующие параметры (Satellite..., 2001): 1) высоту значительного волнения (по ширине переднего фронта отражённого импульса); 2) расстояние от радиолокатора до среднего уровня поверхности (по времени задержки отражённого импульса). По сечению обратного рассеяния можно оценить скорость приводного ветра.

Алгоритм ретрекинга ICE

В формулу Брауна (1) входит много параметров, что приводит к неустойчивости работы алгоритма при обработке зашумлённых данных радиовысотомера. Чтобы сделать алгоритм более устойчивым, для аппроксимации формы отражённого импульса была предложена следующая формула (Amarouche et al., 2004; Thibaut et al., 2010):

$$P(t) = \frac{P_u}{2} \exp(S_T(t - \tau)) \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - \tau}{\sigma_L} \right) \right\} + P_n, \quad (2)$$

где τ — «эпоха» (время, соответствующее половине амплитуды отражённого импульса P_u); σ_L — ширина переднего фронта; S_T — наклон заднего фронта; P_n — уровень теплового шума; erf — интеграл вероятности.

Ширина переднего фронта σ_L связана с дисперсией высот σ_S^2 :

$$\sigma_S = c \sqrt{\frac{\sigma_L^2}{2} - \left(\frac{1}{\sqrt{2 \ln 2}} \tau_{imp} \right)^2}.$$

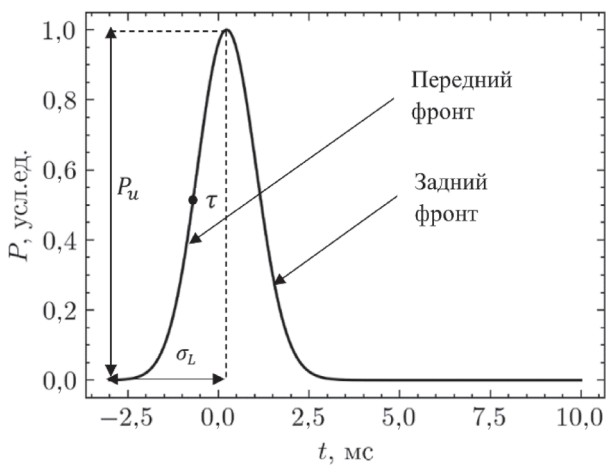


Рис. 2. Пример модельного отражённого импульса

Качественный вид формы импульса (формула (2)) с обозначением основных параметров показан на рис. 2. Далее будем называть выражение (2) формулой ICE. Время $t = 0$ на рисунке соответствует времени двойного хода луча до невозмущённой поверхности.

Аппроксимируя формулу ICE по методу наименьших квадратов, можно получить оценки трёх параметров: эпохи, ширины переднего фронта и наклона заднего фронта. Эпоха τ (англ. Epoch) определяется как положение сигнала в окне анализа по отношению к подспутниковой контрольной точке. Амплитуда отражённого импульса P_u используется для оценки сечения обратного рассеяния σ_0 . В дальнейшем сечение обратного рассеяния используется для вычисления скорости приводного ветра.

Наклон переднего фронта отражённого импульса зависит от дисперсии высоты волнения σ_S^2 , которая связана с высотой значительного волнения формулой

$$H_S = 4\sqrt{\sigma_S^2}$$

в предположении гауссовой функции распределения. Алгоритм, использующий формулу (2), считается более устойчивым по сравнению с алгоритмами, которые используют формулу Брауна.

Модель акустического импульса

Особенностью измерений подводного акустического волнографа становится небольшая глубина размещения гидролокатора и широкая диаграмма направленности антенны. С учётом этих предположений формула для формы отражённого импульса примет следующий вид (Караев и др., 2014):

$$P_{full} = P_1(t) + P_2(t) - P_3(t), \quad (3)$$

где функции $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ представляют собой сумму x - и y -составляющих. Например, $P_1(t) = P_{1x}(t) + P_{1y}(t)$. Эти x - и y -составляющие возникают для учёта анизотропии волнения, т. е. из-за различной дисперсии уклонов вдоль и поперёк направления распространения волнения. Три функции получаются вследствие различных интегрируемых функций на разных этапах формирования отражённого импульса. Дело в том, что на начальном этапе отражённый импульс начинает формироваться ещё до распространения импульса на расстояние до уровня невозмущённой водной поверхности, после касания впадин волны. Далее, после распространения переднего фронта импульса на расстояние до уровня невозмущённой поверхности, отражение начинает формироваться точками внутри круга с увеличивающимся радиусом. После касания заднего фронта излучённого импульса с уровнем невозмущённой водной поверхности отражающие точки будут лежать внутри расширяющегося кольца. Ниже приведены выражения для компонент полной формулы для импульса:

$$\left. \begin{aligned} P_{1x}(t) &= \frac{\sigma_0^*}{2A_x} \left[\exp(A_x h c \tau_{imp}) - 1 \right] \exp\left(-A_x h c t + 2\sigma_S^2 A_x^2 h^2\right) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(A_x h \sqrt{2\sigma_S^2} + \frac{(\tau_{imp} - t)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right) \right\}, \\ P_{2x}(t) &= \frac{\sigma_0^*}{2A_x} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{(\tau_{imp} - t)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{tc}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right) \right\}, \\ P_{3x}(t) &= \frac{\sigma_0^*}{2A_x} \exp\left(-A_x h c t + 2\sigma_S^2 A_x^2 h^2\right) \left\{ \operatorname{erf} \left(A_x h \sqrt{2\sigma_S^2} + \frac{(\tau_{imp} - t)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right) - \operatorname{erf} \left(A_x h \sqrt{2\sigma_S^2} - \frac{tc}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right) \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где c — фазовая скорость распространения излучения в среде (для акустического волнографа равна скорости звука в воде); $A_x = \frac{1}{2\sigma_{xx}^2 h^2} + \frac{5,52}{\delta^2 h^2}$; δ — ширина диаграммы направленности на уровне 0,5 по мощности; σ_{xx}^2 — дисперсия уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной волны излучения волнения вдоль направления распространения; коэффициент $\sigma_0^* = 2,76 |F(0)|^2 / \left(16h^2 \delta^2 \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2} \right)$, где $F(0)$ — эффективный коэффициент отражения при нормальном падении.

Формулы для x - и y -составляющих аналогичны и переходят друг в друга при замене индекса x на y и дисперсии уклонов σ_{xx}^2 на дисперсию уклонов крупномасштабного волнения перпендикулярно направлению распространения σ_{yy}^2 . Тогда выражение для A_y примет вид

$$A_y = \frac{1}{2\sigma_{yy}^2 h^2} + \frac{5,52}{\delta^2 h^2}.$$

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности спектр волнения разделяется на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие по отношению к длине волны излучения. В формулы входит дисперсия уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной волны излучения волнения, и далее будем её называть дисперсией уклонов крупномасштабного волнения.

Пример формы отражённого импульса (формула (3)) с учётом составляющих (4) приведён на *рис. 3* (см. с. 54). Из рисунка видно, что основной вклад в поведение заднего фронта отражённого импульса даёт первый член суммы. Время $t = 0$ соответствует времени двойного хода луча до невозмущённой поверхности.

В модель для формы отражённого импульса (4) дисперсия уклонов крупномасштабного волнения входит через коэффициенты A_x и A_y . Восстановить с помощью одного вертикального излучателя с симметричной диаграммой направленности антенны обе дисперсии нельзя. Было показано, что восстанавливается эффективная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения (Караев и др., 2014), вычисляемая по следующей формуле:

$$\sigma_{eff}^2 = \frac{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2}{2} = \frac{\sigma_{tot}^2}{2}.$$

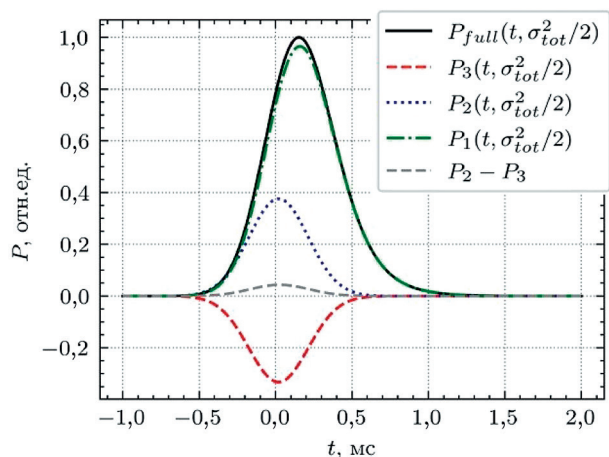


Рис. 3. Форма отражённого импульса P_{full} и её составляющие. Высота значительного волнения $H_S = 0,56$ м, полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения $\sigma_{tot}^2 = 0,022$, глубина погружения $h = 30$ м, длительность импульса $\tau_{imp} = 60$ мкс, ширина ДН — 15°

Рассмотрим чувствительность этой модели к высоте значительного волнения в сравнении с моделью Брауна на рис. 4. Глубина погружения — 30 м, суммарная дисперсия уклонов — 0,022, ширина диаграммы направленности антенны — 15° .

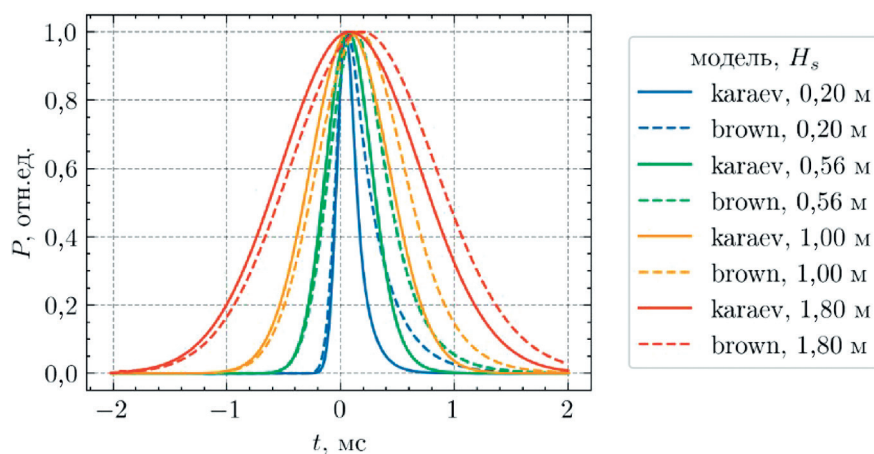
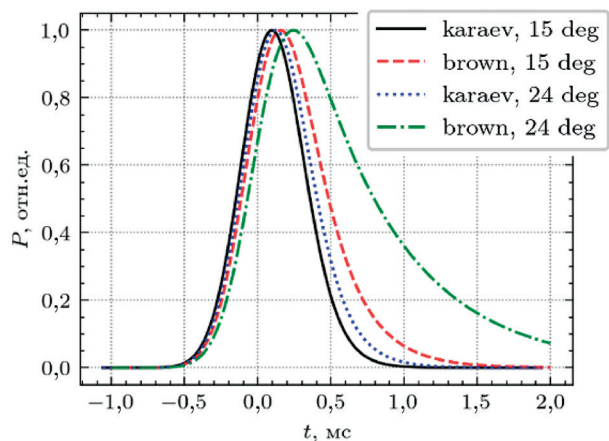


Рис. 4. Сравнение моделей Караева и Брауна для разных высот значительного волнения

По рисунку видно, что передний фронт отражённого импульса обеих моделей одинаково меняется при изменении высоты значительного волнения, что позволяет пользоваться общими алгоритмами восстановления высоты значительного волнения.

Модель Караева сильнее всего расходится с моделью Брауна на заднем фронте отражённого импульса, который формируется под влиянием дисперсии уклонов подстилающей поверхности. Сравнение модели Караева и модели Брауна при фиксированной глубине погружения $h = 30$ м, дисперсии наклонов $\sigma_{tot}^2 = 0,022$, высоте значительного волнения $H_S = 0,56$ м для двух значений диаграммы направленности антенны (15 и 24°) приведено на рис. 5.

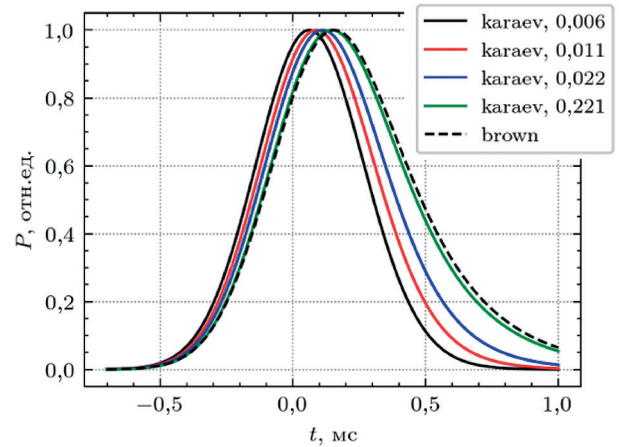


В модель Брауна уклоны не входят, поэтому задний фронт спадает медленнее, чем в модели Караева. Надо отметить, что в предельном случае очень большой дисперсии уклонов модель Караева переходит в модель Брауна.

В связи с этим изменение дисперсии уклонов крупномасштабного волнения не окажет влияния на форму отражённого импульса для модели Брауна.

Рис. 5. Сравнение моделей Караева и Брауна для разных диаграмм направленности антенн. Длительность импульса $\tau_{imp} = 60$ мкс

Рис. 6. Зависимость заднего фронта отражённого импульса модели Караева от дисперсии уклонов крупномасштабного волнения. Сплошными линиями показана форма отражённого импульса при четырёх значениях дисперсии уклонов крупномасштабного волнения (0,006; 0,011; 0,022; 0,221); пунктирной линией показана модель Брауна



На рис. 6 приведено сравнение заднего фронта отражённых импульсов при фиксированной высоте значительного волнения 0,56 м, глубине погружения 30 м, ширине диаграммы направленности 15°, но для разных значений полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения.

Другим важным параметром модели импульса для акустического волнографа выступает длина волны излучения. В модели Брауна длина волны излучения не влияет на форму отражённого импульса, и это не расходится с экспериментами, так как высота крупномасштабного волнения практически не зависит от длины волны излучения, а дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, чувствительная к длине волны излучения, не входит в формулу. Морские буи, данные которых используются для верификации алгоритмов по высоте значительного волнения, не способны измерить дисперсию уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной волны радиолокатора волнения.

На рис. 7 приведены формы отражённых импульсов для разных длин волн излучения при прочих фиксированных параметрах: скорость ветра — 3 м/с, высота значительного волнения — 0,2 м, длительность излучённого импульса — 60 мкс, глубина погружения — 30 м, ширина ДН — 15°. Наблюдаемое различие формы заднего фронта отражённого импульса для разных диапазонов объясняется различием дисперсии уклонов рассеивающей поверхности для разных длин волн. В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности граничное волновое число, определяющее границу между крупномасштабным по сравнению с длиной волны излучения волнением и мелкой рябью, зависит от длины волны излучения.

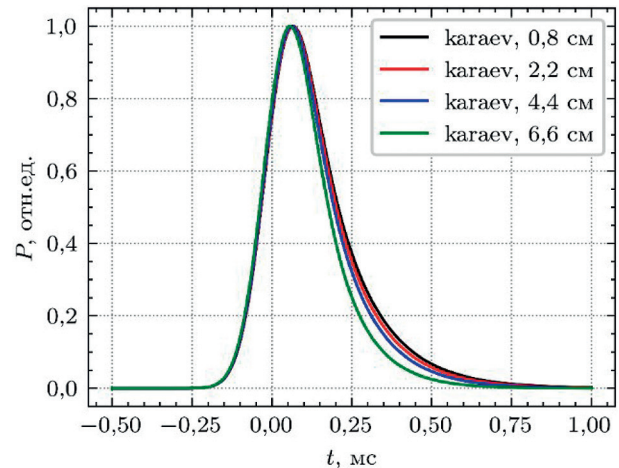


Рис. 7. Зависимость заднего фронта отражённого импульса в модели Караева от длины волны падающего излучения

Таким образом, многочастотный подводный акустический волнограф позволит измерить дисперсию уклонов крупномасштабного волнения для каждой длины волны гидролокатора. Разность дисперсий крупномасштабного волнения содержит информацию об интенсивности волнения на интервале, определяемом граничными волновыми числами, которые зависят от длины волны гидролокатора и параметров волнения.

Заключение

Эксперимент представляется важнейшим этапом научного исследования при проверке выдвинутых гипотез и разработанных теоретических моделей. В то же время проведение «численных»

экспериментов значительно ускоряет процесс их верификации и открывает дополнительные возможности.

Для получения новой информации о поверхностном волнении предлагается использовать многочастотный импульсный подводный акустический волнограф. Измерения на разных частотах дают информацию об интенсивности волнения на разных участках спектра волнения. Многочастотная система находится на стадии разработки, поэтому численный эксперимент становится эффективным инструментом для определения оптимальной схемы измерения и параметров гидролокатора.

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности и метода Кирхгофа для описания формы отражённого импульса использовались две модели: модель Брауна и модель Караева. Сравнение показало существенное различие моделей для случая широкой диаграммы направленности антенны. Обе модели одинаково описывают передний фронт отражённого импульса, однако для широкой диаграммы направленности наблюдаются существенные различия в поведении заднего фронта. Это обусловлено тем, что в модель Брауна не входит дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, которая влияет на мощность отражённого импульса при наклонном падении зондирующего излучения. В результате задний фронт отражённого импульса получается более «затянутым» по сравнению с моделью Караева при прочих равных условиях.

Впервые показано влияние длины волны излучения на форму отражённого импульса, что позволит использовать многочастотные системы для исследования волнения и оценки интенсивности коротковолновой части спектра волнения. Это связано с зависимостью дисперсии уклонов крупномасштабного волнения от длины волны зондирующего излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10089).

Литература

1. Баскаков А. И., Комаров А. А., Михайлов М. С. Методические погрешности высокоточного радиовысотомера при работе над морской поверхностью на малых высотах // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 6. С. 521–529.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Исакович М. А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1952. Т. 23. № 3. С. 305–314.
4. Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титченко Ю. А. Подводный акустический высотомер // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 7. С. 543–554.
5. Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Беляев Р. В., Яблоков А. А., Понур К. А., Баранов В. И., Очередник В. В. Определение высоты значительного волнения по анализу формы отражённого акустического импульса: измерения акустического волнографа в Черном море и сравнение с ADCP // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020, Москва. 2020. С. 242. <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>.
6. Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Беляев Р. В., Яблоков А. А., Баранов В. И., Очередник В. В. Измерение статистических характеристик морской поверхности с помощью подводного акустического волнографа в Чёрном море и сравнение с ADCP // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 189–294. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-189-204>.
7. Amarouche L., Thibaut P., Zanife O. Z., Dumont J.-P., Vincent P., Steunou N. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects // Marine Geodesy. 2004. V. 27. P. 171–197. <https://doi.org/10.1080/01490410490465210>.
8. Barric D. E. Rough surface scattering based on the specular point theory // IEEE Trans. AP-16. 1968. V. 16. No. 4. P. 449–554. <https://doi.org/10.1109/TAP.1968.1139220>.
9. Baskakov A. I., Komarov A. A., Ruban A. V., Ka M.-H. Limiting Accuracy of Height Measurement for a Precision Radar Altimeter in a Low Altitude Flying Vehicle above the Sea Surface // Remote Sensing. 2021. V. 13(14). Art. No. 2660. <https://doi.org/10.3390/rs13142660>.

10. *Brown G.* The average impulse response of a rough surface and its applications // *IEEE J. Oceanic Engineering*. 1977. V. 2. No. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1109/JOE.1977.1145328>.
11. *Chelton D. B., Walsh E. J., MacArthur J. L.* Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 1989. V. 6. P. 407–438. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1989\)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1989)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2).
12. *Dally W. R., Osiecki D. A.* Comparison of Deep-water ADCP and NDBC Buoy Measurements to Hindcast Parameters // *Proc. Intern. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*. 2004. 12 p.
13. *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*. NDBC Technical Document 09-02. NDBC, 2009. 78 p. <https://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf>.
14. *Kouraev A. V., Crétaux J. F., Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Mamedov R., Zakharova E. A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Bergé-Nguyen M.* Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // *Coastal Altimetry* / eds. Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. Berlin: Springer, 2011. P. 331–366. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_13.
15. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A handbook of Techniques and Applications* / eds. Fu L. L., Cazenave A. L.; San Diego: Academic Press, 2001. 464 p.
16. *Strong B., Brumley B., Terray E., Stone G.* The performance of ADCP-derived directional wave spectra and comparison with other independent measurements // *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. and Exhibition*. 11–14 Sept. 2000. Providence, RI, USA, 2000. P. 1195–1203. DOI: 13.1109/OCEANS.2000.881763.
17. *Thibaut P., Poisson J. C., Bronner E., Picot N.* Relative Performance of the MLE3 and MLE4 Retracking Algorithms on Jason-2 Altimeter Waveforms // *Marine Geodesy*. 2010. V. 33. P. 317–335. <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.491033>.

Pulsed sonar for sea wave parameters retrieval — Part 1: Theoretical models

K. A. Ponur, Yu. A. Titchenko, V. Yu. Karaev, M. S. Ryabkova

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: ponur@ipfran.ru

Despite the fact that the experiment is the most important stage of scientific research when testing hypotheses and developed models, the possibility of conducting numerical experiments significantly speeds up the process of their verification. Even more popular is the use of numerical simulation at the stage of development, manufacture and testing of a new device. In this case, the numerical experiment makes it possible to evaluate the reliability of the theoretical models used, the accuracy of the processing algorithms, to determine the optimal measurement scheme and, in this case, the sonar parameters. To obtain new information about surface waves, it is proposed to use a multi-frequency underwater acoustic wave gauge and its efficiency can be estimated using numerical simulation (numerical experiment). To describe the shape of the reflected pulse, two analytical models were used: the Brown model and the Karaev model. For the first time, a comparison of the models showed their difference for sonar with a wide antenna pattern. Significant differences in the behavior of the trailing edge of the reflected pulse are because the slope variance of the scattering surface is not included in the Brown model. For the first time, the influence of the radiation wavelength on the shape of the reflected pulse is shown, which will make it possible to use multifrequency systems to measure the intensity of the short-wavelength part of the wave spectrum.

Keywords: quasi-specular scattering, Kirchhoff approximation, scattering of waves on a rough surface, shape of the reflected pulse, sonar, significant wave height, slope variance of large-scale waves, processing algorithm

Accepted: 03.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-49-58

References

1. Baskakov A. I., Komarov A. A., Mikhailov M. S., Methodological errors of a high-precision airborne radio altimeter operating at low altitudes above the sea surface, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2017, Vol. 60, No. 6, pp. 467–474, DOI: 10.1007/s11141-017-9815-x.
2. Bass F. G., Fuks I. M., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
3. Isakov M. A., Scattering of waves from a statistically rough surface, *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1952, Vol. 23, No. 3, pp. 305–314 (in Russian).
4. Karaev V. Yu., Meshkov E. M., Titchenko Yu. A., Underwater acoustic altimeter, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 57, No. 7, pp. 488–497. DOI: 10.1007/s11141-014-9531-8.
5. Ryabkova M. S., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Meshkov E. M., Belyaev R. V., Yablokov A. A., Ponur K. A., Baranov V. I., Ocherednik V. V., Determining the Height of Significant Waves by Analyzing the Shape of the Reflected Acoustic Pulse: Acoustic Wave Gauge Measurements in the Black Sea and Comparison with ADCP, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 16–20 Nov. 2020, Moscow, 2020, p. 242 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>.
6. Ryabkova M. S., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Meshkov E. M., Belyaev R. V., Yablokov A. A., Baranov V. I., Ocherednik V. V., Measurement of statistical characteristics of the sea surface using an underwater acoustic wave gauge in the Black Sea and comparison with ADCP, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Issue 18, No. 2, pp. 189–294 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-189-204>.
7. Amarouche L., Thibaut P., Zanife O. Z., Dumont J.-P., Vincent P., Steunou N., Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, pp. 171–197, <https://doi.org/10.1080/01490410490465210>.
8. Barric D. E., Rough surface scattering based on the specular point theory, *IEEE Trans. AP-16*, 1968, Vol. 16, No. 4, pp. 449–554, <https://doi.org/10.1109/TAP.1968.1139220>.
9. Baskakov A. I., Komarov A. A., Ruban A. V., Ka M.-H., Limiting Accuracy of Height Measurement for a Precision Radar Altimeter in a Low Altitude Flying Vehicle above the Sea Surface, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(14), Art. No. 2660, <https://doi.org/10.3390/rs13142660>.
10. Brown G., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1977, Vol. 2, No. 1, pp. 67–74, <https://doi.org/10.1109/JOE.1977.1145328>.
11. Chelton D. B., Walsh E. J., MacArthur J. L., Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, Vol. 6, pp. 407–438, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1989\)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1989)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2).
12. Dally W. R., Osiecki D. A., Comparison of Deep-water ADCP and NDBC Buoy Measurements to Hindcast Parameters, *Proc. Intern. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 2004, 12 p.
13. *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*, NDBC Technical Document 09-02, NDBC, 2009, 78 p., <https://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf>.
14. Kouraev A. V., Crétaux J. F., Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Mamedov R., Zakharova E. A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Bergé-Nguyen M., Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea, *Coastal Altimetry*, Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. (eds.), Berlin: Springer, 2011, pp. 331–366, https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_13.
15. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A handbook of Techniques and Applications*, Fu L. L., Cazenave A. (eds.), London; San Diego: Academic Press, 2001, 464 p.
16. Strong B., Brumley B., Terray E., Stone G., The performance of ADCP-derived directional wave spectra and comparison with other independent measurements, *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. and Exhibition*, 11–14 Sept, 2000, Providence, RI, USA, 2000, pp. 1195–1203, DOI: 13.1109/OCEANS.2000.881763.
17. Thibaut P., Poisson J. C., Bronner E., Picot N., Relative Performance of the MLE3 and MLE4 Retracking Algorithms on Jason-2 Altimeter Waveforms, *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33, pp. 317–335, <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.491033>.