

Импульсный гидролокатор, предназначенный для восстановления параметров водной поверхности. Часть 2: Численное моделирование и алгоритм восстановления

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 — 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. В этом случае численный эксперимент позволяет оценить достоверность используемых теоретических моделей, точность алгоритмов обработки, определить оптимальную схему проведения измерений. 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 теоретического описания формы отражённого импульса в предыдущей работе (часть 1) использовались две аналитические модели: модель Брауна и модель Караева. Данная статья (часть 2) посвящена численному моделированию отражения акустических волн водной поверхностью в квазизеркальной области отражения. Моделируется работа подводного акустического волнографа с широкими диаграммами направленности антенн в двух диапазонах длин излучённых волн: 8 мм и 23 см. Сравнение «измеренных» в численном эксперименте импульсов с полученными по теоретической формуле подтвердило работоспособность разработанного алгоритма ретрекинга, использующего теоретическую модель импульса Караева.

Ключевые слова: квазизеркальное рассеяние, численное моделирование, форма отражённого импульса, гидролокатор, высота значительного волнения, дисперсия уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной акустической волны волнения, алгоритмы обработки, ретрекинг

Одобрена к печати: 20.07.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-69-80

Введение

Разработка нового прибора для измерения параметров волнения включает несколько этапов, содержание которых зависит от имеющегося теоретического и экспериментального задела. Предполагается, что многочастотный подводный акустический волнограф (или импульсный гидролокатор) впервые позволит измерять параметры коротковолновой части спектра волнения. Одним из способов оценки эффективности предлагаемого подхода к решению этой задачи представляется проведение «численного» эксперимента, который включает моделирование волнения и моделирование измерений разрабатываемым подводным акустическим волнографом.

В многочастотном подводном акустическом волнографе измерения будут выполняться на нескольких частотах. Дисперсия уклонов крупномасштабного по сравнению с длиной волны гидролокатора волнения (далее — дисперсия уклонов крупномасштабного волнения) (Запевалов и др., 2020; Danilytchev et al., 2009; Freilich, Vanhoff, 2003), влияющая на отражённый сигнал, зависит от частоты излучения, и предполагается, что основным информационным параметром будет разность дисперсий уклонов крупномасштабного волнения. Дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, которая может быть измерена гидролокатором, определяется интегралом от спектра уклонов поверхности, взятым в пределах от нуля

до граничного волнового числа, которое зависит от интенсивности волнения и длины волны излучения. Разность дисперсий уклонов, измеренных гидролокаторами, работающими на разных длинах волн, будет определяться интегралом по спектру уклонов в пределах граничных волновых чисел используемых гидролокаторов. Вычисленные таким образом разностные дисперсии уклонов будут содержать информацию о волнении для выбранного диапазона длин волн. Особенность вычисления разности уклонов — вычитание крупномасштабного волнения, которое включает длинноволновую часть спектра волнения, способного распространяться на большие расстояния и не связанного с локальным ветром. Разность дисперсий уклонов крупномасштабного волнения, измеренных в разных частотных диапазонах, может стать новым интегральным параметром для характеристики поверхностного волнения. Этот параметр позволит исследовать влияние различных условий формирования волнения (скорости ветра, длины ветрового разгона, волн зыби) в коротковолновой части спектра (диапазон длин поверхностных волн от 50 см до нескольких сантиметров).

Как известно, численное моделирование активно используется для решения прямой и обратной задачи радиолокационного дистанционного зондирования водной поверхности. Например, для решения прямой задачи вычисления сечения обратного рассеяния и доплеровского спектра отражённого сигнала пользуются точным решением интегрального уравнения рассеяния (Torokov, Brown, 2000). Результаты такого моделирования согласуются с общепризнанными моделями обратного рассеяния в пределах их применимости (например, (Басс, Фукс, 1972; Elfouhaily, Guérin, 2004)) и позволяют моделировать отражения от заданной поверхности. Кроме того, данный подход позволил предложить новый способ измерения морских волн радиолокатором (Torokov, Ouellette, 2021; Torokov, Sletten, 2012), который не описывался моделями обратного отражения. В дальнейшем на базе этого численного моделирования были проведены натурные эксперименты (Ouellette et al., 2022), подтвердившие зависимость характеристик отражённого излучения от высоты волны. Хорошо известны работы по численному моделированию радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (Alpers, 1983). Результаты моделирования позволили разработать методы восстановления параметров модельного спектра волнения по измерениям радиолокаторов с синтезированной апертурой (Chapron et al., 2001; Hasselmann et al., 1996; Zhang et al., 2015). Численное моделирование выступает необходимым этапом разработки новых приборов дистанционного зондирования, например радиолокатора на низколетающих носителях (Баскаков и др., 2017; Baskakov et al., 2021), космического волнового скаттерометра SWIM (*англ.* Surface Waves Investigation and Monitoring instrument) (Hauser et al., 2001) и скаттерометра с ножевой диаграммой направленности антенны (Lin et al., 2019) на этапе подготовки концепции спутника CFOSAT (*англ.* Chinese-French Oceanic SATellite). В указанных работах в рамках численного эксперимента по заданному спектру волнения моделируется отражающая водная поверхность, затем из геометрии схемы измерений и параметров радиолокатора вычисляется отражённый сигнал. «Измеренный» в численном эксперименте сигнал сравнивается с аналитической моделью. Далее этот измеренный сигнал используется в качестве входного параметра в алгоритмах решения обратной задачи (алгоритмах ретрекинга). В настоящей работе также реализован данный подход — проведён численный эксперимент.

Первая часть работы (Понур и др., 2023) посвящена обзору и сравнению существующих моделей отражённого водной поверхностью импульса при вертикальном зондировании. Для понимания различий было приведено описание модели Брауна, формулы ICE (лёд) и модели импульса Караева. В результате сравнения моделей были подчеркнуты ограничения их применимости для рассматриваемой схемы измерений. Для теоретического описания отражённого сигнала подводного акустического импульсного высотомера в данной статье используется модель Караева, так как она единственная учитывает вклад дисперсии уклонов крупномасштабного волнения в формирование отражённого импульса.

Во второй части исследования численный эксперимент используется для проверки выводов, которые были получены в ходе теоретического анализа. Моделируется работа подводного акустического волнографа с широкими диаграммами направленности антенн в двух диапазонах длин излучённых волн: 8 мм и 23 см. С помощью измеренных в численном экспе-

рименте импульсов проводится оценка работоспособности разработанного алгоритма ретрекинга, использующего теоретическую модель.

Постановка задачи

Подробно вопрос моделирования морской поверхности и её свойства обсуждаются в публикации (Понур и др., 2021). В настоящей работе воспользуемся разработанным программным обеспечением и вычислим отражённый акустический сигнал, т. е. проведём численный эксперимент.

Рассмотрим схему измерений подводного акустического волнографа на рис. 1. Приёмопередающая антенна ориентирована вертикально вверх на водную поверхность.

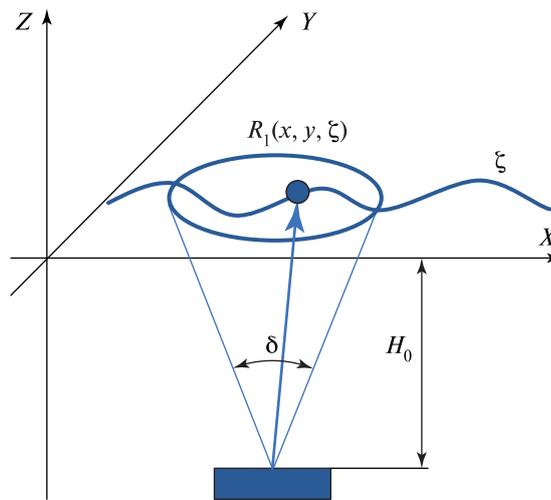


Рис. 1. Схема измерений

Для выбранной схемы измерения подводного акустического волнографа (глубины погружения H_0 , ширины диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности δ , длины волны гидролокатора, длительности и частоты следования импульсов) моделировалась морская поверхность ζ , расположенная над волнографом и формирующая отражённый сигнал. При моделировании волнения задаётся скорость приводного ветра на высоте 10 м и длина ветрового разгона. Поверхность моделировалась с гауссовыми (англ. Gaussian) функциями плотности вероятности высот и уклонов. Наиболее известный способ моделирования морской поверхности по спектру волнения заключается в суммировании гармоник с детерминированными амплитудами и случайными фазами.

Отражённая мощность вычисляется как некогерентная (без учёта фазы) сумма от всех отражающих точек подстилающей поверхности:

$$P_0(t) = \alpha \sum_{i=1}^M \left(\frac{G(\vec{r}_i)}{|\vec{r}_i|} \right)^4 f \left(t - \frac{2|\vec{r}_i|}{c} \right),$$

где суммирование выполняется по всем отражающим точкам; $|\vec{r}_i|$ — расстояние от излучателя до отражающей точки; α — некоторый постоянный коэффициент, включающий эффективный коэффициент отражения; c — скорость звука в воде; $G(\vec{r}_i)$ — диаграмма направленности антенны в направлении точки с радиус-вектором $\vec{r}_i(x, y)$:

$$G(\vec{r}_i) = \exp \left[-\frac{2 \ln 2}{\delta^2} \left(\arctan^2 \frac{x-x_0}{H_0} + \arctan^2 \frac{y-y_0}{H_0} \right) \right],$$

где x_0, y_0 — координаты центра засветки среднего уровня водной поверхности диаграммой направленности антенны; $f(t)$ — форма излучённого импульса. В настоящей работе импульс предполагается прямоугольным длительностью τ :

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & 0 \leq t \leq \tau; \\ 0, & t > \tau. \end{cases}$$

При суммировании смоделированная поверхность считается «зеркальной», если нормаль к поверхности параллельна радиус-вектору от гидролокатора в данную точку. Будем считать, что происходит зеркальное отражение от поверхности, если угол между нормалью и радиус-вектором не превышает 1° . Для соответствия амплитуды модельного импульса формуле Караева (Караев и др., 2014) необходимо произвести следующую нормировку:

$$P(t) = \sigma_0 \frac{P_0(t)}{\max P_0(t)},$$

где $\max P_0(t)$ — максимум модельного импульса по амплитуде; σ_0 — сечение обратного рассеяния отражающей поверхности для соответствующей антенны.

В рамках теоретических моделей (Караев и др., 2014; Brown, 1977) максимум отражённого импульса связан с сечением обратного рассеяния σ_0 , которое вычисляется следующим образом (Титченко, Караев, 2016):

$$\sigma_0 = \frac{|V_{eff}|^2}{2\sqrt{[\sigma_{xx}^2 + \delta^2/11,04][\sigma_{yy}^2 + \delta^2/11,04]}},$$

где $|V_{eff}|^2$ — эффективный коэффициент отражения; σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 — дисперсии уклонов крупномасштабного волнения в двух перпендикулярных плоскостях. Полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения вычисляется как $\sigma_{total}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2$. Следует отметить, что в рамках приближения Кирхгофа, с помощью которого получена формула Караева, и в выражении для сечения обратного рассеяния, приведённом выше, отражающая поверхность делится на крупномасштабное и мелкомасштабное волнение относительно длины волны излучения. В результате дисперсия уклонов, входящая в формулы, зависит не от всех масштабов длин волн на поверхности, а только от крупномасштабного по сравнению с длиной волны излучения волнения. Учёт влияния мелкомасштабного волнения на отражённый сигнал происходит с помощью эффективного коэффициента отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля.

При выполнении численного эксперимента с гидролокатором в данной работе вычисляется реализация морской поверхности размером 58×58 м с шагом 50 см для двух длин волн излучения: 8 мм и 23 см. Длина волны локатора влияет на параметры поверхности, которые вносят вклад в характеристики отражённого излучения (Nouguier et al., 2016). Статистические параметры волн для моделирования поверхности рассчитываются с использованием модели спектра волн (Ryabkova et al., 2019). Во всех случаях ветровые волны считаются полностью развитыми и распространяющимися вдоль оси X . Скорость ветра задаётся на высоте 10 м. Частота следования импульсов моделируемого гидролокатора определяет шаг по времени для моделируемой поверхности и в данном случае была равна 0,25 Гц, а время накопления — 800 с. Ширина диаграммы направленности антенны для всех гидролокаторов — 30° . Глубина установки гидролокатора предполагается равной 100 м. Для моделирования скорость звука в воде составляет 1500 м/с. Длина излучённого импульса — 60 мкс. По полученному усреднённому отражённому импульсу алгоритмом ретрекинга по формуле Караева вычисляются статистические параметры поверхности: расстояние от гидролокатора до уровня невозмущённой поверхности, σ_s^2 — дисперсия ординат водной поверхности (высота значительного волнения находится как $4\sqrt{\sigma_s^2}$) и полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения.

Восстановление расстояния до уровня невозмущённой поверхности в настоящей работе не обсуждается.

Моделирование отражённого акустического импульса

Рассмотрим сравнение двух мгновенных (одиночных) импульсов с усреднённым за 800 с импульсом (рис. 2). Длина волны гидролокатора — 8 мм, скорость ветра — 8 м/с.

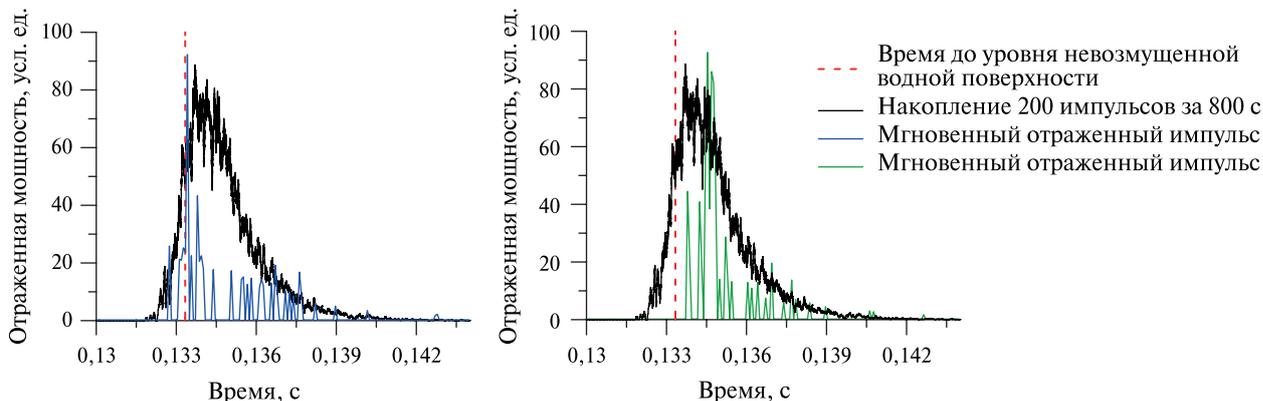


Рис. 2. Сравнение двух произвольных мгновенных отражённых импульсов с усреднённым за 800 с

На рисунке видно, что мгновенные импульсы (синий и зелёный) сильно отличаются как друг от друга, так и от усреднённого. Это связано с размером пятна засветки водной поверхности при глубине гидролокатора 100 м, определяемым диаграммой направленности антенны (радиус пятна засветки составляет 27 м).

Рассмотрим, какие параметры отражающей поверхности моделируются на первом этапе численного эксперимента. На рис. 3 приведены зависимости высоты значительного волнения и полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения смоделированной поверхности от числа усреднённых реализаций поверхности.

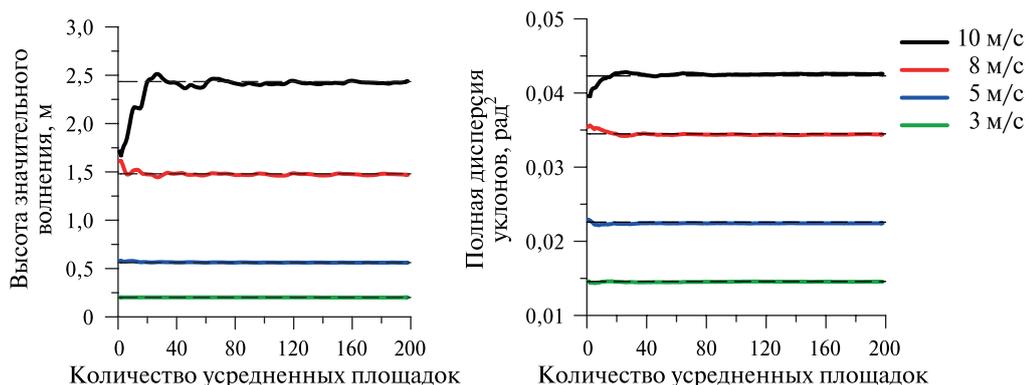


Рис. 3. Зависимости высоты значительного волнения и полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения смоделированной поверхности от числа усреднённых реализаций поверхности

Из рисунка видно, что чем больше скорость ветра, тем дольше происходит накопление статистически достоверной оценки. Это связано с тем, что длина доминантной волны на поверхности воды растёт со скоростью ветра (для ветра 3 м/с она равна 8 м, для ветра 10 м/с — 92 м) и, соответственно, требуется больше времени накопления, чтобы получить достоверную статистическую оценку для разной скорости ветра при одинаковом размере пятна засветки.

Однако в формулу Караева для теоретического расчёта формы отражённого импульса входит не скорость ветра, а именно наблюдаемые параметры волнения. Соответственно, при теоретическом расчёте необходимо использовать параметры, которые наблюдались в численном эксперименте.

Сравним результаты численного моделирования отражённого импульса с расчётом по формуле Караева (рис. 4). Вычисления выполнены для длин волн гидролокатора 8 мм и 23 см. Скорость ветра — 8 м/с. Время накопления в численном моделировании было равно 800 с.

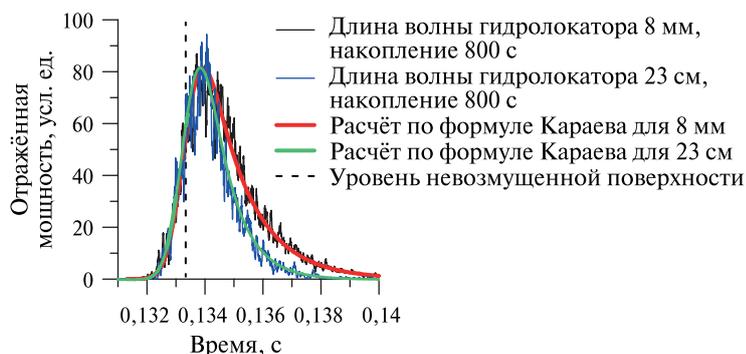


Рис. 4. Сравнение отражённых импульсов, полученных в результате численного моделирования и по формуле Караева, для длин волн гидролокаторов 8 мм и 23 см

На рисунке видно, что передний фронт отражённых импульсов почти не зависит от длины волны гидролокатора. Это объясняется тем, что наклон переднего фронта отражённого импульса зависит от высоты значительного волнения, которая слабо чувствительна к выбору длины волны гидролокатора. А вот задний фронт импульса, напротив, сильно отличается. Это связано с тем, что задний фронт отражённого импульса сильно зависит от наблюдаемой дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, которая зависит от длины волны гидролокатора.

На рис. 5 приведено сравнение отражённого импульса с расчётом по формуле Караева для скорости ветра 3 и 8 м/с. Длина волны гидролокатора — 8 мм.

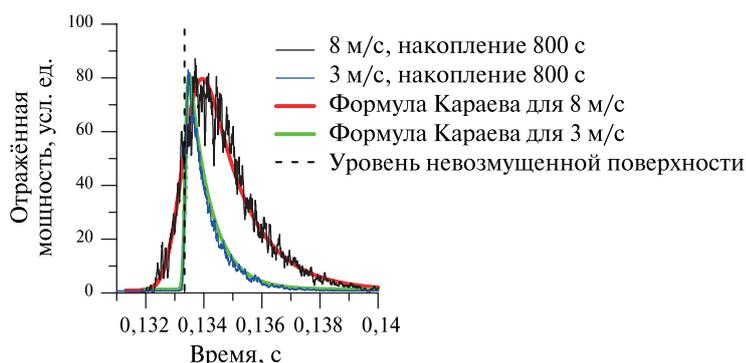


Рис. 5. Сравнение отражённых импульсов, полученных в результате численного моделирования и по формуле Караева, для скорости ветра 3 и 8 м/с

Рисунок показывает, что при изменении скорости ветра сильно изменяется и передний, и задний фронт отражённого импульса, так как происходит изменение высоты волнения и дисперсии уклонов крупномасштабного волнения. Из рис. 4 и 5 также видно совпадение формы импульсов, полученных двумя независимыми способами.

Рассмотрим работу метода восстановления параметров волнения по форме отражённого импульса. Метод основан подборе (ретрекинге) параметров модели для формы импульса. При аппроксимации смоделированного среднего отражённого импульса формулой Караева применяется метод наименьших квадратов (Chelton et al., 2001). В результате восстанавливается расстояние от гидролокатора до невозмущённой водной поверхности, дисперсия ординат поверхности и полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения.

Сравнение результатов ретрекинга с параметрами волнения, наблюдавшимися при моделировании за 800 с для гидролокаторов с длиной волны 8 мм и 23 см, представлено на *рис. 6*.

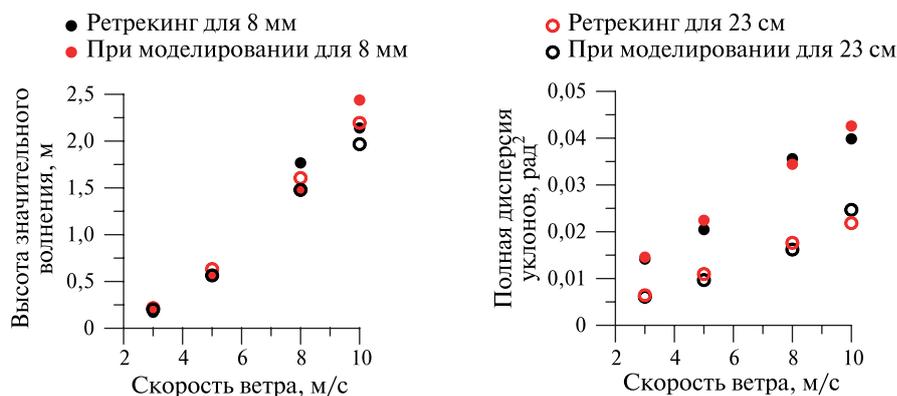


Рис. 6. Сравнение результатов ретрекинга с параметрами волнения, наблюдавшимися при моделировании за 800 с для гидролокаторов с длиной волны 8 мм и 23 см для различных скоростей приводного ветра

Из рисунка видно, что с ростом скорости ветра появляется небольшое различие между высотами значительного волнения, восстановленными по данным гидролокаторов, с длиной волн 8 мм и 23 см: для 8 мм высота значительного волнения больше (ретрекинг). Также различие наблюдается при моделировании измерений гидролокаторов. На результат в данном случае влияет тот факт, что за 800 с не успела накопиться статистически достоверная оценка высоты значительного волнения для скорости ветра 8 и 10 м/с. Кроме того, для формирования устойчивой формы отражённого импульса также требуется больше времени усреднения (больше импульсов). Неустойчивая, «изрезанная» форма отражённого импульса приводит к снижению точности алгоритма ретрекинга.

Как показывает рисунок для дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, различие между заданными и восстановленными значениями увеличивается, что связано с ростом изрезанности среднего отражённого импульса из-за недостаточности времени усреднения.

Эксперимент

В качестве примера рассмотрим обработку импульсов, измеренных в ходе первого эксперимента с многочастотным подводным акустическим волнографом на морской гидрофизической платформе в Чёрном море, расположенной вблизи п.г.т. Кацивели в 2021 г.

Многочастотный подводный акустический волнограф был вывешен с платформы на тропе на глубину около 20 м. На *рис. 7* (см. с. 76) приведены формы отражённых импульсов на частоте 40 и 80 кГц, усреднённые за 150 с. Длительность излучённого импульса на частоте 40 кГц равна 180 мкс, на частоте 80 кГц — 90 мкс.

За счёт усреднения по времени удаётся минимизировать шумы, и форма импульса становится достаточно устойчивой (гладкой). Измеренные импульсы показаны на рисунке красным цветом. Результат ретрекинга по модели Караева приведён в *таблице*, а подобранный (теоретический) импульс показан на *рис. 7* чёрным цветом.

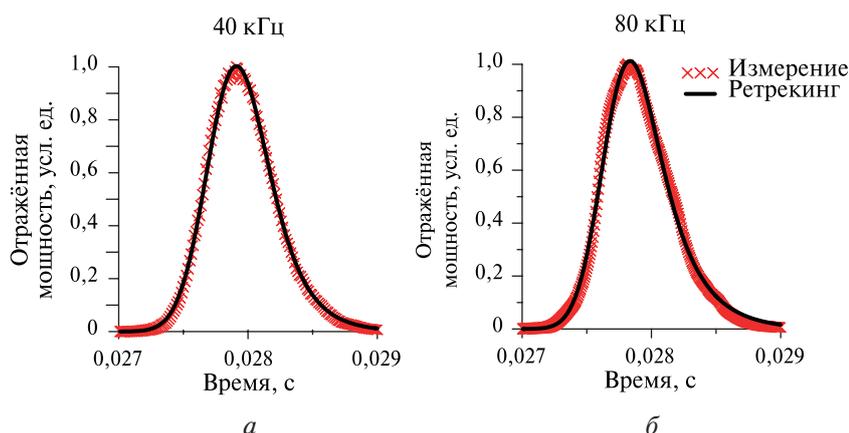


Рис. 7. Пример отражённых импульсов подводного акустического волнографа, усреднённых за 150 с: а — частота 40 кГц; б — 80 кГц. Красные крестики — измеренный импульс, чёрная кривая — формула Караева

Результаты ретрекинга экспериментальных данных

Частота, кГц	Высота значительного волнения, м	Расстояние до поверхности, м	Дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, рад ²
40	0,73	20,85	0,0073
80	0,64	20,84	0,0109

Дисперсия уклонов крупномасштабного волнения на частоте 80 кГц больше, чем на частоте 40 кГц. Как и ожидалось, расстояние до поверхности восстанавливается хорошо на обеих частотах.

Предполагалось, что высота значительного волнения окажется одинаковой для обеих частот, однако в данном эксперименте это предположение не подтвердилось. Это может быть связано с временной изменчивостью волнения: измерения выполнялись последовательно и между сеансами прошло около 10 мин. Также погрешность определения высоты значительного волнения определяется длительностью зондирующего импульса, а она у этих двух импульсов различается в два раза (погрешность 14 см для 40 кГц и 7 см для 80 кГц). Дальнейшие эксперименты позволят уточнить данный вопрос.

Используя результаты ретрекинга из *таблицы*, сравним работу формулы Брауна с измерениями подводного акустического волнографа на *рис. 8*.

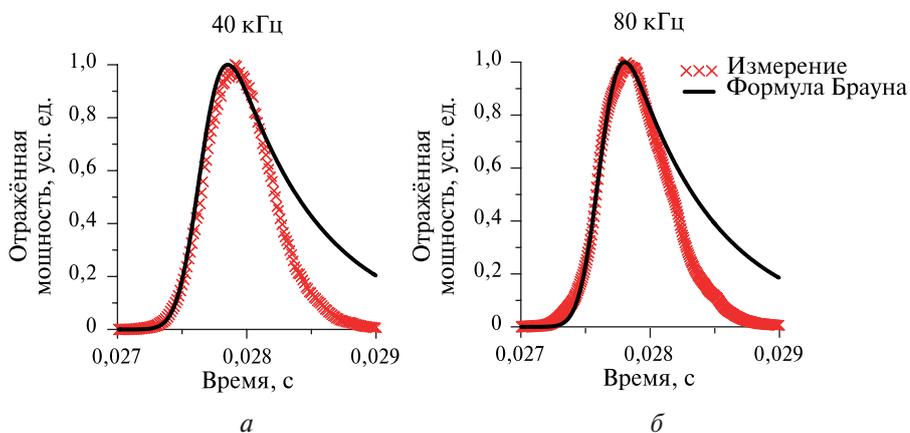


Рис. 8. Отражённые импульсы подводного акустического волнографа: а — частота 40 кГц, б — 80 кГц. Красные крестики — измеренный импульс, чёрная кривая — формула Брауна

Из рисунка видно, что импульсы по формуле Брауна сильно отличаются от полученных в эксперименте при малой глубине и широкой диаграмме направленности антенны. В результате формулу Брауна нельзя использовать при обработке таких измерений.

Заключение

Впервые проведено численное моделирование отражённого акустического импульса для небольших глубин установки гидролокатора с учётом длины волны излучения, ширины диаграммы направленности антенны и длительности импульса. Результаты сравнения теоретической формулы и результатов численного моделирования стали одновременно подтверждением эффективности численного эксперимента и достоверности теоретической модели Караева для формы отражённого импульса. Следовательно, в дальнейшем для решения обратной задачи необходимо использовать формулу Караева.

Впервые был протестирован метод обработки (ретрекинга) для восстановления параметров волнения на основе модели Караева. Впервые смоделированные импульсы использовались в новом методе обработки и были восстановлены высота значительного волнения и дисперсия уклонов крупномасштабного волнения. Приведён пример использования разработанного алгоритма ретрекинга для обработки отражённых импульсов, измеренных в ходе эксперимента.

Работа выполнена в рамках госзадания Института прикладной физики РАН (FFUF-2021-0006).

Литература

1. Баскаков А. И., Комаров А. А., Михайлов М. С. Методические погрешности высокоточного радиовысотомера при работе над морской поверхностью на малых высотах // Изв. высш. учеб. заведений. 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. Запезалов А. С., Шумейко И. П., Абрамович А. Ю. Зависимости характеристик уклонов морской поверхности от пространственных диапазонов создающих их волн // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.5.15.
4. Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титченко Ю. А. Подводный акустический высотомер // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 7. С. 543–554.
5. Понур К. А., Караев В. Ю., Рябкова М. С. К вопросу о моделировании морской поверхности применительно к решению задач дистанционного зондирования // Материалы Всерос. открытой науч. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Всерос. открытые Армандовские чтения. Муром: МИ ВлГУ, 2021. С. 214–221.
6. Понур К. А., Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Рябкова М. С. Импульсный гидролокатор, предназначенный для восстановления параметров водной поверхности. Часть 1: Теоретические модели // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 49–58. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-49-58.
7. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Особенности теоретической модели спектральных и энергетических характеристик рассеянных волн с учетом диаграмм направленности приемной и излучающей антенн при зондировании морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 67–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-67-83.
8. Alpers W. Monte Carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture radar image spectra // J. Geophysical Research: Oceans. 1983. V. 88. No. C3. P. 1745–1759. DOI: 10.1029/JC088iC03p01745.
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. No. 14. Article 2660. DOI: 10.3390/rs13142660.
10. Brown G. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. V. 25. P. 67–74. DOI: 10.1109/TAP.1977.1141536.

11. *Chapron B., Johnsen H., Garello R.* Wave and wind retrieval from sar images of the ocean // *Annales Des Télécommunications*. 2001. V. 56. No. 11. P. 682–699. DOI: 10.1007/BF02995562.
12. *Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J., Fu L.-L., Callahan P. S.* Chapter 1: Satellite Altimetry // *Intern. Geophysics / eds. Fu L.-L., Cazenave A.* Academic Press, 2001. V. 69. P. 1–133. DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80146-7.
13. *Danilytchev M. V., Kutuza B. G., Nikolaev A. G.* The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependences in Estimation of Interaction between Microwave Radiation and Rough Sea Surface // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 47. No. 2. P. 652–661. DOI: 10.1109/tgrs.2008.2004410.
14. *Elfouhaily T., Guérin C.* A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces // *Waves in Random Media*. 2004. V. 14. No. 4. P. 1–40. DOI: 10.1088/0959-7174/14/4/R01.
15. *Freilich M. H., Vanhoff B. A.* The Relationship between Winds, Surface Roughness, and Radar Backscatter at Low Incidence Angles from TRMM Precipitation Radar Measurements // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003. V. 20. No. 4. P. 549–562. DOI: 10.1175/1520-0426(2003)20<549:trbwsr>2.0.co;2.
16. *Hasselmann S., Brüning C., Hasselmann K., Heimbach P.* An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1996. V. 101. No. C7. P. 16615–16629. DOI: 10.1029/96JC00798.
17. *Hauser D., Soussi E., Thouvenot E., Rey L.* SWIMSAT: A Real-Aperture Radar to Measure Directional Spectra of Ocean Waves from Space — Main Characteristics and Performance Simulation // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. V. 18. No. 3. P. 421–437. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0421:SARART>2.0.CO;2.
18. *Lin W., Dong X., Portabella M. et al.* A Perspective on the Performance of the CFOSAT Rotating Fan-Beam Scatterometer // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. No. 2. P. 627–639. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2858852.
19. *Nouguier F., Mouche A., Rasclé N. et al.* Analysis of Dual-Frequency Ocean Backscatter Measurements at Ku- and Ka-Bands Using Near-Nadir Incidence GPM Radar Data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. V. 13. No. 9. P. 1310–1314. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2583198.
20. *Ouellette J. D., Bounds W. T., Dowgiallo D. J., Toporkov J. V., Hwang P. A.* On the Sensitivity of Passive Multistatic Radar Amplitude and Doppler Measurements to Significant Wave Height // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022. T. 19. C. 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2020.3048270.
21. *Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y.* A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. No. 10. P. 7104–7134. DOI: 10.1029/2018JC014804.
22. *Toporkov J. V., Brown G. S.* Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2000. V. 38. No. 4. P. 1616–1625. DOI: 10.1109/36.851961.
23. *Toporkov J. V., Ouellette J. D.* Numerical Simulations and Analysis of Beam-Resolved In-Plane Bistatic Scattering in a Wavetank Setup // *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*. 2021. P. 7315–7318. DOI: 10.1109/igarss47720.2021.9553112.
24. *Toporkov J. V., Sletten M. A.* Numerical Simulations and Analysis of Wide-Band Range-Resolved HF Backscatter from Evolving Ocean-Like Surfaces // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 8. P. 2986–3003. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2178032.
25. *Zhang B., Li X., Perrie W., He Y.* Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2015. V. 120. No. 9. P. 6164–6184. DOI: 10.1002/2015JC011052.

Pulsed sonar for sea wave parameters retrieval — Part 2: Numerical simulation and retrieval algorithm

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

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

Even though the experiment is the most important stage of scientific research in testing the hypotheses and the developed models, the possibility of carrying out 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, a numerical experiment makes it possible to assess the reliability of the theoretical models used, the accuracy of processing algorithms, to determine the optimal measurement scheme and the parameters of the sonar. 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). For the theoretical description of the shape of the reflected pulse in the previous part of the work, two analytical models were used: the Brown model and the Karaev model. This part of the work is devoted to the numerical modeling of the reflection of acoustic waves of the water surface in the quasi-specular reflection region. The operation of an underwater acoustic wave gauge with wide antenna patterns in two ranges of radiated wavelengths of 8 mm and 23 cm is simulated. Comparison of the impulses “measured” in the experiment with those obtained using the theoretical formula confirmed the efficiency of the developed retracking algorithm using the theoretical model of the Karaev impulse.

Keywords: quasi-specular scattering, numerical simulation, reflected pulse shape, sonar, significant wave height, variance of large-scale slopes, processing algorithms, retracking

Accepted: 20.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-69-80

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., *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p. (in Russian).
3. Zapevalov A. S., Shumeyko I. P., Abramovich A. Yu., Dependences of the characteristics of sea surface slopes on the spatial ranges of the waves creating them, *Zhurnal Radioelektroniki*, 2020, No. 5 (in Russian), <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.5.15>.
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. Ponur K. A., Karaev V. Yu., Ryabkova M. S., On the issue of modeling the sea surface in relation to solving problems of remote sensing, *Materialy Vserossiiskoi otkrytoi nauchnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln”, Vserossiiskie otkrytye Armandovskie chteniya* (Proc. All-Russian Open Scientific Conf. “Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction”, All-Russian Open Armandov Readings), Murom: MI VIGU, 2021, pp. 214–221 (in Russian).
6. Ponur K. A., Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Ryabkova M. S., Pulsed sonar for the sea wave parameters retrieval. Part 1: Theoretical Models, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 49–58 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-49-58>.
7. Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Peculiarities of a modified model of spectral and energy characteristics of scattered waves considering the emitting and receiving antenna patterns for bistatic sensing of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 67–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-67-83.
8. Alpers W., Monte Carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture radar image spectra, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1983, Vol. 88, No. C3, pp. 1745–1759, <https://doi.org/10.1029/JC088iC03p01745>.
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, No. 14, Article 2660, <https://doi.org/10.3390/rs13142660>.
10. Brown G., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1977, Vol. 25, pp. 67–74, DOI: 10.1109/TAP.1977.1141536.
11. Chapron B., Johnsen H., Garello R., Wave and wind retrieval from sar images of the ocean, *Annales Des Télécommunications*, 2001, Vol. 56, No. 11, pp. 682–699, DOI: 10.1007/BF02995562.
12. Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J., Fu L.-L., Callahan P. S., Chapter 1: Satellite Altimetry, *Intern. Geophysics*, Fu L.-L., Cazenave A. (eds.), Academic Press, 2001, Vol. 69, pp. 1–133, DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80146-7.
13. Danilytchev M. V., Kutuzova B. G., Nikolaev A. G., The Application of Sea Wave Slope Distribution Empirical Dependences in Estimation of Interaction Between Microwave Radiation and Rough Sea

- Surface, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, pp. 652–661, DOI: 10.1109/tgrs.2008.2004410.
14. Elfouhaily T., Guérin C., A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces, *Waves in Random Media*, 2004, Vol. 14, No. 4, pp. 1–40, DOI: 10.1088/0959-7174/14/4/R01.
 15. Freilich M. H., Vanhoff B. A., The Relationship between Winds, Surface Roughness, and Radar Backscatter at Low Incidence Angles from TRMM Precipitation Radar Measurements, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, pp. 549–562, DOI: 10.1175/1520-0426(2003)20<549:trbwsr>2.0.co;2.
 16. Hasselmann S., Brüning C., Hasselmann K., Heimbach P., An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1996, Vol. 101, No. C7, pp. 16615–16629, DOI: 10.1029/96JC00798.
 17. Hauser D., Soussi E., Thouvenot E., Rey L., SWIMSAT: A Real-Aperture Radar to Measure Directional Spectra of Ocean Waves from Space — Main Characteristics and Performance Simulation, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, Vol. 18, No. 3, pp. 421–437, DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0421:SAR ART>2.0.CO;2.
 18. Lin W., Dong X., Portabella M. et al., A Perspective on the Performance of the CFOSAT Rotating Fan-Beam Scatterometer, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, Vol. 57, No. 2, pp. 627–639, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2858852.
 19. Nouguier F., Mouche A., Rasclé N. et al., Analysis of Dual-Frequency Ocean Backscatter Measurements at Ku- and Ka-Bands Using Near-Nadir Incidence GPM Radar Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 13, No. 9, pp. 1310–1314, DOI: 10.1109/LGRS.2016.2583198.
 20. Ouellette J. D., Bounds W. T., Dowgiallo D. J. et al., On the Sensitivity of Passive Multistatic Radar Amplitude and Doppler Measurements to Significant Wave Height, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, Vol. 19, pp. 1–5, DOI: 10.1109/LGRS.2020.3048270.
 21. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Y., A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, No. 10, pp. 7104–7134, DOI: 10.1029/2018JC014804.
 22. Toporkov J. V., Brown G. S., Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 4, pp. 1616–1625, DOI: 10.1109/36.851961.
 23. Toporkov J. V., Ouellette J. D., Numerical Simulations and Analysis of Beam-Resolved In-Plane Bistatic Scattering in a Wavetank Setup, *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2021, pp. 7315–7318, DOI: 10.1109/igarss47720.2021.9553112.
 24. Toporkov J. V., Sletten M. A., Numerical Simulations and Analysis of Wide-Band Range-Resolved HF Backscatter From Evolving Ocean-Like Surfaces, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 2986–3003, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2178032.
 25. Zhang B., Li X., Perrie W., He Y., Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, No. 9, pp. 6164–6184, DOI: 10.1002/2015JC011052.