

ПРИМЕНЕНИЕ КЕПСТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛОВ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН

© 2021 г. И. А. Кириченко^{а, *}, В. Ю. Вишневецкий^б, И. Б. Старченко^б, Т. П. Строчан^с,
А. И. Марколия^с, И. И. Сизов^с

^аФедеральное государственное автономное учреждение высшего образования “Южный федеральный университет”,
Некрасовский пер. 44, Таганрог, 347922 Россия

^бОбщество с ограниченной ответственностью “Параметрика”,
ул. Свободы 19, корп. 1, Таганрог, 347902 Россия

^сАкадемия наук Абхазии, ул. Н.Я. Марра 9, Сухум, Республика Абхазия

*e-mail: ikirichenko@sfedu.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принята к публикации 08.02.2021 г.

При разведке донных отложений важной задачей является определение границ слоистой структуры. Эхоимпульс является суперпозицией отражений от нескольких границ раздела и акустическая ситуация становится неинформативной. При перекрытии эхосигналов от различных границ, превышающем 50% от длительности импульса, был применен метод кепстрального анализа отраженных сигналов. Кепстр эхосигнала от слоистой структуры позволил выделить моменты прихода составляющих отражений. Показано, что кепстр низкочастотного эхоимпульса позволяет однозначно определить момент прихода эхосигнала от второй границы раздела при перекрытии меньшем 90%. Статья подготовлена по материалам доклада на 3-й Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург).

Ключевые слова: кепстр, отраженные сигналы, низкочастотный эхосигнал, слоистая структура

DOI: 10.31857/S0320791921030060

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач применения методов цифровой обработки сигналов связана с помехами в эхосигналах [1]. Помехи всегда возникают при работе систем дистанционного зондирования и определяются целым рядом причин, например, есть эхосигналы из-за отражения от границ, наложенные на излучаемый сигнал, а также они могут быть вызваны неоднородностью среды распространения акустических волн [2].

В случае работы гидроакустической системы дистанционного зондирования в условиях мелководья [3, 4] принятый эхосигнал характеризуется многократными переотражениями из-за малого расстояния между поверхностью и дном. Кроме того, помехи создают трудности для анализа и обработки эхосигналов от слоистой структуры при профилировании донных структур из-за многократных переотражений, а также эффектов наложения эхоимпульсов [5, 6].

При излучении параметрической антенной зондирующего импульса происходит отражение

от двух границ раздела [7]. Если расстояние между границами раздела превышает половину пространственной протяженности излучаемого сигнала, то эхоимпульсы различимы. Если пространственные размеры слоя таковы, что акустический импульс полностью перекрывает слой, происходит наложение эхоимпульсов.

Восстановление сигнала, который был искажен как по частоте, так и по времени из-за эффектов многократных переотражений и шума, является распространенной проблемой, встречающейся при профилировании донных структур. При вертикальной схеме профилирования донных структур обрабатывается эхосигнал, отраженный в обратном направлении. При этом разрешающая способность по дистанции при использовании тонального зондирующего импульса определяется половиной его длительности [8, 9].

В рассматриваемой ситуации принятый эхосигнал может рассматриваться как сумма исходного сигнала и его многократных переотражений, вызванных близостью границ раздела донных структур. Задержанные во времени компоненты

сигнала трудно разделить, используя обратную фильтрацию из-за ее неточности. Преимущество линейной фильтрации при применении к добавленным компонентам эхосигнала состоит в том, что если поведение фильтра для каждого из компонентов эхосигнала известно, то поведение для суммы эхосигналов является суммой ответов, которая удовлетворяет принципу суперпозиции. При определении процедуры фильтрации для разделения сигналов, которые были неаддитивно объединены, например, путем умножения или свертки, компоненты эхосигнала обычно труднее разделить, а во многих случаях нецелесообразно использовать для процедуры фильтрации линейную систему.

В работе [10] разработана модель эхо-сигнала от жесткой границы и рассмотрены вопросы выделения характеристик временной задержки узкополосных эхо-сигналов. Выделены характеристики эхо-сигнала в кепстральной области и предложена вейвлет-обработка для усиления эффекта оценки временной задержки. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что выделенные характеристики временной задержки согласуются с характеристиками подводной цели, что подтверждает эффективность кепстрального метода.

Данная статья является продолжением исследования авторов в области повышения разрешающей способности параметрических систем [7, 11], теоретические исследования подтверждены лабораторным экспериментом.

МЕТОДЫ

Поясним суть используемого кепстрального метода. Пусть имеем два почти идентичных сигнала, задержанных один относительно другого. Суммарный сигнал может быть представлен как

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t - \tau). \quad (1)$$

В результате быстрого преобразования Фурье (БПФ) и поставленного ему в соответствие некоторого z -преобразования данный сигнал примет вид, описываемый выражением

$$S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega) \exp(-i\omega\tau) = S(z)[1 + \exp(-i\omega\tau)]. \quad (2)$$

Полученное произведение можно представить как свертку двух функций времени, описываемых выражением вида

$$S(t) = S_1(t) \otimes S_2(t). \quad (3)$$

В рассматриваемом случае две функции временной области сворачиваются вместе, при этом одна функция представляет прямой сигнал, а другая является функцией задержки по времени. В частотной области преобразование Фурье двух

функций умножается. Поскольку преобразование Фурье не ограничено по полосе, две функции занимают одну и ту же полосу частот, и частотно-зависимая фильтрация не может быть использована для удаления нежелательной функции. Взятие логарифма умноженных функций и обратного преобразования Фурье в кепстральную (временную) область приводит к функциям, которые теперь пересекаются в области или областях, где обе их амплитуды относительно малы. В кепстральной области может быть применена нормальная фильтрация для удаления того, что соответствует нежелательной функции. Требуемая функция – передаваемый сигнал – может быть частично восстановлена путем преобразования Фурье того, что остается в кепстральной области, возведения в степень, а затем обратного преобразования Фурье. В последующем в результате обратного преобразования Фурье от результата логарифмирования может быть получен сигнал, именуемый кепстром.

На практике кепстр мощности эффективен, если вейвлет и импульсная последовательность, свертка которых представляет составные данные, занимают разные диапазоны частот [12]. Таким образом, полагается, что кепстр мощности последовательности данных является квадратом обратного z -преобразования логарифма квадрата величины z -преобразования последовательности данных.

Если принять, что отраженные акустические сигналы достигают приемной антенны разными путями, то прямой сигнал, отраженный от первой границы, определяется как $S_1(t)$, а модель акустических сигналов, отраженных от N структур рассеяния, рассматривается как многокомпонентный сигнал $S_2(t)$. Тогда в принятом сигнале $S(t)$ характеристика многокомпонентного сигнала $S_2(t)$ может быть выражена как

$$S_2(t) = \sum_{i=1}^N a_i \delta(t - \tau_i), \quad (4)$$

где a_i и τ_i обозначают амплитуду и задержку принятого сигнала с i -й структуры соответственно.

Кепстр принятого сигнала $C(n)$ определяется следующим образом:

$$C(n) = F^{-1} \{ \lg F \{ S(n) \} \} = F^{-1} \{ \lg F \{ S_1(n) \otimes S_2(n) \} \} = C_{S_1}(n) + C_{S_2}(n), \quad (5)$$

где $S_1(z)$ и $S_2(z)$ обозначают z -преобразования $S_1(n)$ и $S_2(n)$, а $C_{S_1}(n)$, $C_{S_2}(n)$ – кепстр $S_1(n)$ и $S_2(n)$.

С целью проверки возможности применения кепстрального анализа эхосигналов при профилировании слоистой структуры с использованием параметрических антенн [7], а также выбора оптимального алгоритма вычисления кепстров экспериментально исследовались следующие задачи:

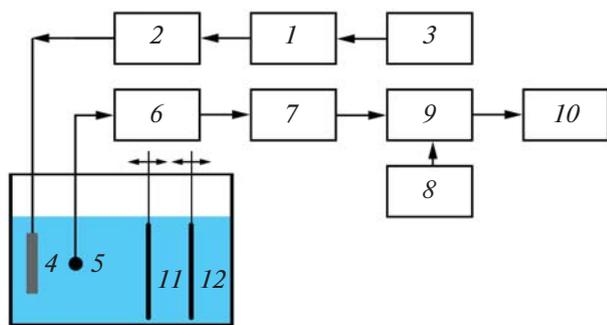


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

– зависимость кепстров эхосигналов от времени задержки отраженного от второй границы импульса;

– зависимость кепстра интерференционного эхосигнала от амплитуды сигнала, отраженного от второй границы раздела;

– помехоустойчивость кепстров.

Базовые принципы гидроакустических измерений с использованием параметрических антенн изложены в [13]. Структурная схема установки, предназначенной для исследования кепстров отраженных от двух границ раздела сигналов, представлена на рис. 1.

Функционально структурную схему можно разделить на следующие устройства:

– устройство формирования исходного сигнала накачки;

– устройство усиления и излучения сигнала накачки в среду;

– устройство приема, предварительной обработки эхосигнала;

– устройство сопряжения и обработки эхосигналов.

Следует отметить, что экспериментально моделировались отраженные от двух границ раздела сигналы, которые в спектральной области также остаются визуально неразличимыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для эхоимпульсов с различным пространственным перекрытием вычислялись их кепстры. На рис. 2 показаны кепстры эхосигналов при их наложении соответственно на 10, 20 и 30%. Длительность зондирующего сигнала 1 мс, частота формируемой волны 10 кГц, амплитуда сигнала, отраженного от первой границы, составляет 15% от амплитуды отражения от второй границы. Такое амплитудное соотношение между импульсами достигалось при завешивании в гидроакустическом бассейне (см. рис. 4) пластины из оргстекла (11) и стальной пластины (12).

Получаемые кепстры (рис. 2) позволяют определить положение второй границы раздела. Однако, ширина кепстрального пика не постоянна, что вносит погрешность при детерминировании границ. На рис. 3а представлена зависимость кепстрального пика, отвечающего за перекрытие отражений, от величины задержки эхосигнала от второй границы. На рис. 3б представлена зависимость амплитуды кепстрального пика от фазовых соотношений слагаемых, рассчитанная по экспериментально полученным импульсам. Явно просматривается осциллирующий характер зависимости. На рис. 3в представлена зависимость амплитуды кепстрального пика от амплитуды отраженного сигнала от второй границы.

Из рис. 3а видно, что зависимость амплитуды кепстрального пика от величины задержки отраженного сигнала от второй границы является осциллирующей функцией. Очевидно, это связано с изменением пространственной фазы отраженного сигнала от второй границы раздела.

Для выяснения характера помехоустойчивости кепстров эхосигналов была проведена серия экспериментов. В устройстве формирования сигналов накачки 3 (см. рис. 1) предусмотрена возможность регулирования амплитуды возбуждения параметрического излучателя. Изменением амплитуды возбуждения варьировалось отношение сигнал/шум. При каждом изменении этого отношения вычислялся кепстр экспериментально полученных эхоимпульсов.

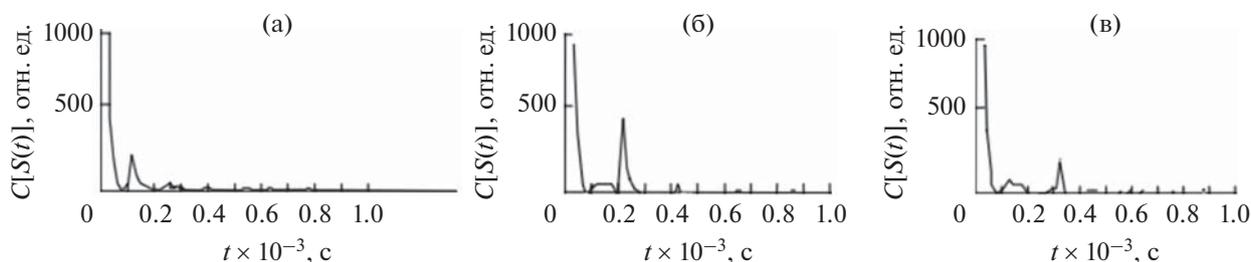


Рис. 2. (а) — Кепстр эхосигнала при задержке импульса от второй границы на 10% от длительности сигнала; (б) — кепстр эхосигнала при задержке импульса от второй границы на 20% от длительности сигнала; (в) — кепстр эхосигнала при задержке импульса от второй границы на 30% от длительности сигнала.

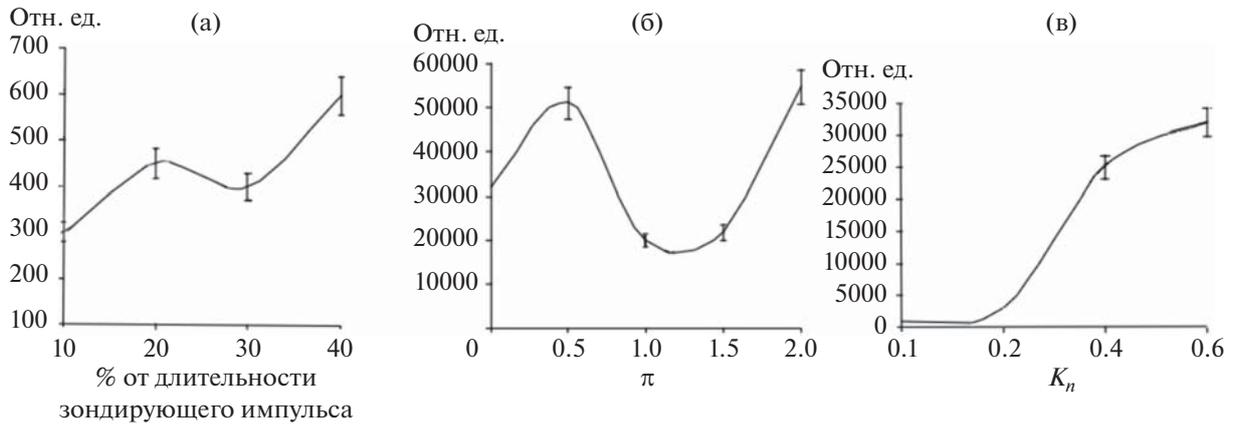


Рис. 3. (а) – Зависимость амплитуды кепстрального пика от величины задержки эхосигнала от второй границы; (б) – зависимость амплитуды кепстрального пика от фазовых соотношений слагаемых в эхосигнале; (в) – зависимость амплитуды кепстрального пика от фазовых соотношений слагаемых в эхосигнале.

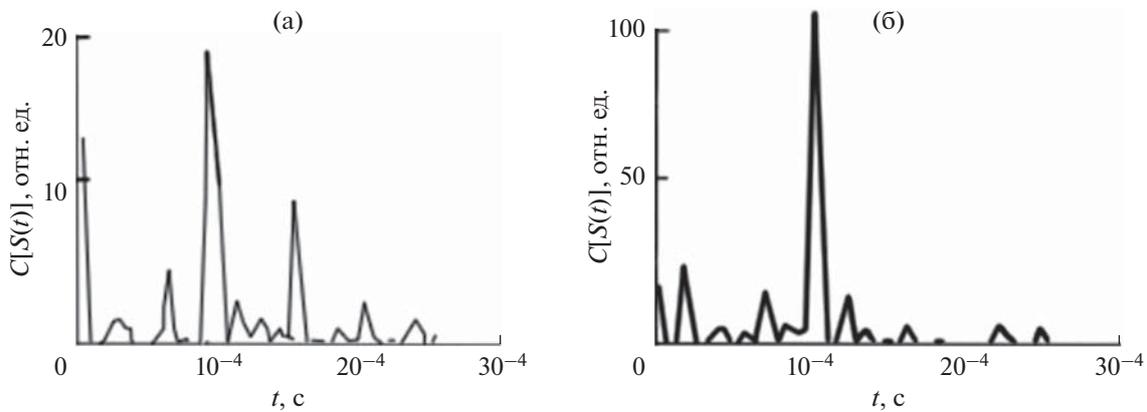


Рис. 4. (а) – Кепстр эхосигнала при отношении амплитуды отраженного сигнала от второй границы и шума равном двум; (б) – кепстр эхосигнала при отношении сигнал/шум равном двум, вычисленный с использованием прямоугольного окна.

На рис. 4 показан кепстр эхосигнала ($t = 1$ мс, $F = 10$ кГц) при отношении сигнал/шум равном двум. На рис. 4а изображен кепстр аналогичного эхосигнала при обработке эхоимпульса прямоугольным окном.

Из сравнения рис. 4а и 4б видно, что обработка эхоимпульса окном приводит к улучшению разрешающей способности кепстра при определении момента прихода отраженного сигнала от второй границы раздела.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ расчетных и экспериментально полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- кепстр низкочастотного эхоимпульса позволяет однозначно определить момент прихода эхосигнала от второй границы раздела при отноше-

нии амплитуды сигнала, отраженного от первой границы, к амплитуде сигнала, отраженного от второй границы, меньшем 30 дБ;

- кепстр низкочастотного эхоимпульса позволяет однозначно определить момент прихода эхосигнала от второй границы раздела при перекрытии эхоимпульсов меньшем 90%;

- однозначно можно определить момент прихода эхосигнала от второй границы раздела при отношении амплитуды сигнала, отраженного от второй границы раздела, к амплитуде шума большим 2 (в лабораторных условиях);

- введение обработки эхоимпульса прямоугольным окном позволяет существенно повысить помехоустойчивость кепстра эхоимпульса;

- осциллирующий характер зависимости амплитуды кепстрального пика от величины задержки отраженного от второй границы раздела сигнала объясняется пространственным набегом

фазы отраженного сигнала от второй границы раздела;

– кепстральный анализ эхосигналов при локации параметрическими антеннами более помехоустойчив, чем при локации линейными антеннами;

– основанный на уникальных преимуществах кепстра в оценке задержки по времени, метод кепстрального анализа может быть применен при обработке эхосигналов от слоистой структуры для повышения разрешающей способности по дистанции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-40005\19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korneliussen R.J. Measurement and removal of echo integration noise // ICES J. Marine Science. 2000. № 57. P. 1204–1217.
2. Kozaczka E., Grelowska G. Theoretical Model of acoustic wave propagation in shallow water // Polish maritime research. 2017. V. 24. № 2. P. 48–55. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0049>
3. Есинов И.Б., Попов О.Е., Солдатов Г.В. Компрессия сигнала параметрической антенны в мелководном волноводе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 490–498. <https://doi.org/10.1134/S0320791919040051>
4. Есинов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 56–61.
5. Петров П.С., Голов А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Козицкий С.Б., Сорокин М.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространении импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акуст. журн. 2020. Т. 66. С. 20–33.
6. Фокина М.С., Фокин В.Н. Отражение плоских волн от упругой слоистой среды: резонансный подход и численное моделирование // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 690–697.
7. Кириченко И.А., Старченко И.Б. Адаптивные гидроакустические средства: состояние и перспективы развития // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9(146). С. 20–24.
8. Бросалин А.В., Кириченко И.А., Старченко И.Б., Тимошенко В.И. Особенности формирования поля параметрической антенны в средах с неоднородной структурой // Известия ТРТУ. 1998. № 3(9). С. 62.
9. Kirichenko I., Starchenko I. Directivity of hydroacoustic systems with parametric array in marine conditions // J. Physics: Conference Series. 2019. V. 1353(1). P. 5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012089>
10. Hongjian J., Xiukun L., Xiangxia M., Yang Y. Extraction of echo characteristics of underwater target based on cepstrum method // J. Marine Sci. Appl. 2017. V. 16. P. 216–224. <https://doi.org/10.1007/s11804-017-1407-9>
11. Кириченко И.А., Вишневецкий В.Ю., Старченко И.Б., Марколия А.И., Сизов И.И., Строчан Т.П. Системный анализ особенностей работы параметрического профилографа при вертикальной схеме профилирования слоистой структуры дна // Сборник трудов XXXII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2019. С. 1102–1108. ISBN: 978-5-89-118-802-0.
12. Oppenheim A.V., Schaffer R.S. From Frequency to Quefrency: A History of the Cepstrum // IEEE Signal processing magazine. 2004. № 9. P. 95–106. <https://doi.org/10.1109/MSP.2004.1328092>
13. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.