

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.6.08

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА ПРЯМОГО СИГНАЛА ОТ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВНОГО ИСТОЧНИКА В ВОЛНОВОДЕ

© 2015 г. К. В. Костенко, Ю. С. Крюков

ФГУП “НИИ прикладной акустики”

141980 Московская обл., г. Дубна, ул. 9 Мая 7а

E-mail: costyco.rus@gmail.com

Поступила в редакцию 09.02.2015 г.

Разработан метод детектирования импульса прямого сигнала по крутому фронту нарастания акустического давления. Суть метода состоит в вычислении зеркальной производной принятого сигнала и ее специальной нормировке, что позволяет достичь эффекта усиления слабого прямого сигнала и подавления сильного отраженного. Ключевой особенностью метода является высокая вероятность детектирования импульсов прямого сигнала при минимальном уровне ложных срабатываний.

Ключевые слова: акустические волны, акустический датчик, гидрофон, взрывной источник, координаты взрыва, прямой сигнал, производная сигнала, зеркальная производная.

DOI: 10.7868/S0320791915060076

ВВЕДЕНИЕ

В морской навигации при выполнении экспериментальных работ, а также при оценке позиционирования подводных объектов, весьма актуальной является задача дистанционной оценки координат срабатывания подводных импульсных источников. Наиболее часто применяемыми подводными импульсными источниками являются взрывные источники. Для определения координат срабатывания импульсных источников применяется акустический метод триангуляции с использованием относительных задержек акустических сигналов, зарегистрированных датчиками в пространственно разнесенных точках приема с известными координатами [1–4].

Определение моментов регистрации импульсов прямого сигнала в точках приема является первым шагом в задаче вычисления координат срабатывания взрывного источника. При детонации взрывчатого вещества в водной среде возникают сложные физические явления, связанные с образованием ударной волны, генерацией при взрыве газового пузыря от продуктов взрыва, его движением к поверхности (всплыванием) и периодическими пульсациями [5].

На рис. 1 приведена осциллограмма звукового давления, зарегистрированного на расстоянии 10 м от срабатывания импульсного источника (петарды) на глубине 4 м. Первый импульс представляет собой импульс от ударной волны, второй — импульс от пульсации газового пузыря. Период времени между импульсом ударной волны и импульсом от пульсации газового пузыря является постоянным при

неизменной глубине подрыва и постоянной массе заряда [6]. Однако при распространении сигнала от взрывного источника в мелководной среде импульсы ударной волны, отраженные от границ волновода и пришедшие разными путями, складываются с импульсами от пульсаций газового пузыря. Временами в точке приема они дают осциллограммы, на которых амплитуды прямых сигналов ударной волны имеют значения меньше, чем амплитуды сигналов, отраженных от границ.

В мелком море широкополосный сигнал от подводного взрыва в точку приема приходит в виде волновых пакетов с разными групповыми скоростями, соответствующими приходу отдельных нормальных волн [7] (о локализации источников в мелководном канале см. также [8]). На большом расстоянии от взрывного источника в задаче дистанционной оценки координат срабатывания источника в принятом сигнале можно учитывать только первую нормальную волну, так как она приходит в точку приема первой [9].

Для определения времен прихода прямого сигнала от взрывного источника могут быть использованы различные методы: превышение заданного порога сигнала; нахождение максимума корреляционной функции полученного сигнала с ранее записанным образцом; вычисление когерентности сигнала с образцом и последующее нахождение ее максимума; анализ энергетических свойств сигнала с помощью оператора ТКЕО (Teager–Kaiser Energy Operator); вычисление производной сигнала и ее модификаций. Целесообразность применения того или иного метода зависит от конкретных техниче-



Рис. 1. Осциллограмма звукового давления, зарегистрированного на расстоянии 10 м от срабатывания петарды на глубине 4 м.

ских и физических условий [10], так как каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

Применение пороговой схемы является простым и быстрым способом обнаружения прямого сигнала от взрывного источника. Однако схема может сработать на отраженном сигнале, если импульс прямого сигнала вследствие физических свойств распространения акустических волн имеет малую амплитуду.

Методы, основанные на взаимной корреляции сигналов, широко применяются для нахождения временных задержек между сигналами [11–13]. При таком подходе вычисляется коэффициент корреляции выборки сигнала с имеющимся образцом. Момент прихода прямого сигнала определяется по превышению коэффициентом корреляции некоторого значения. Однако в случае слабого прямого сигнала наибольшей корреляцией с имеющимся образцом сигнала нередко будет обладать фрагмент, относящийся к пульсациям от газового пузыря и отраженным волнам. К тому же данный метод является вычислительно затратным и в случае применения в системах реального времени предъявляет повышенные требования к их производительности.

Методы анализа когерентности [14–16] позволяют учитывать спектральные характеристики сигналов, что дает некоторое преимущество над корреляционными методами. Рассчитывается функция когерентности, обратное преобразование которой во временную область позволяет получить значение временной задержки между сигналами в месте, где имеется пик функции. Ключевой особенностью подобных методов является низкий процент срабатывания на отраженном сигнале, что предотвращает возможные ошибки определения временных задержек в случае отсутствия прямого сигнала. Однако они требовательны к качеству принимаемого сигнала и в случае слабых импульсов прямого сигнала не обнаруживают их. Методы анализа когерентности также являются вычислительно затратными,

что ограничивает их применение в системах реального времени.

Применение энергетического оператора ТКЕО [17] для детектирования момента прихода прямого сигнала от взрывного источника основано на крутом фронте нарастания энергии сигнала. На базе данного оператора разработан ряд методов определения временных задержек между сигналами, например, [18]. Из-за квадратичной зависимости, лежащей в его основе, оператор обладает свойством усиления участков сигнала, имеющих высокую скорость изменения звукового давления. Однако большее усиление получает сигнал с большой амплитудой, в то время как сигнал с малой амплитудой усиливается недостаточно. Поэтому в случае слабого прямого сигнала подобный алгоритм сработает на отраженном сигнале, что повлечет ошибку в определении временной задержки. Положительной стороной данного алгоритма является низкая вычислительная сложность, что позволяет использовать его в системах реального времени и в портативных устройствах.

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА ПРЯМОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ НОРМИРОВАННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

Использование производной для детектирования импульса [19, 20] прямого сигнала основано на его ключевой характеристике, а именно крутом фронте нарастания акустического давления. Для определения момента прихода прямого сигнала необходимо отслеживать превышение положительной производной сигнала некоторого порога. Порог при этом должен быть адаптивным, чтобы не зависеть от уровня сигнала. Естественным решением в данной ситуации является нормировка производной сигнала на переменную величину, являющуюся ее скользящим средним. Нормировка решает одновременно несколько задач: во-первых, приводит сигналы с различной амплитудой к примерно одинаковому диапазону; во-вторых, уменьшает амплитуду “широких” импульсов отраженного сигнала практически до уровня шума; и в-третьих, усиливает “короткие” импульсы прямого сигнала, увеличивая их относительную амплитуду.

Исследование данного подхода и характеристик сигналов от взрывных источников показало, что для детектирования импульса прямого сигнала предпочтительно применять некоторую модификацию производной — *зеркальную производную*. Термин *зеркальной производной* введен нами для удобства обозначения, основываясь на образной интерпретации зеркальности некоторых ее свойств относительно обычной производной. Математиче-

ски зеркальная производная есть не что иное, как производная от модуля функции.

Зеркальная производная дискретного сигнала в i -й (текущий) момент времени вычисляется по формуле:

$$D_i = |S_i| - |S_{i-1}|,$$

где S_i — значение сигнала в текущий момент времени, S_{i-1} — в предыдущий. Использование зеркальной производной в рамках рассматриваемого метода связано со следующими этапами обработки сигнала. Необходимо привести средний уровень сигнала к нулю (выполнить центровку), так как зеркальная производная зависит от расположения сигнала относительно нуля. Центровка может быть выполнена путем вычитания из сигнала его скользящего среднего значения. Далее вычисляется зеркальная производная сигнала по вышеприведенной формуле. После чего следует обнулить отрицательные значения зеркальной производной, так как они не содержат информации о фронте импульса прямого сигнала.

Как уже отмечалось, необходима нормировка производной. Из исследованных многочисленных вариаций нормировки наилучшие результаты достигнуты при нормировке на взвешенное скользящее среднее значение зеркальной производной. При этом важную роль имеет распределение весов, задаваемых различным точкам в пределах скользящего окна. Распределение весов, приведенное на рис. 2, показало наилучшие результаты.

Период скользящего среднего, приведенного на рисунке, равен 400 (при частоте оцифровки 100 кГц—4 мс). Подобный период был выбран эмпирически в ходе обработки имеющихся экспериментальных данных, чтобы, с одной стороны, быть достаточно небольшим для увеличения вероятности нахождения импульсов прямого сигнала, а с другой стороны — достаточно большим для уменьшения вероятности нахождения ложных импульсов, относящихся к отраженному сигналу.

При вычислении скользящего среднего вес точек вблизи текущего значения задается равным нулю. При этом импульсы прямого сигнала, характеризующиеся длительностью не более 1 мс (100 отсчетов при частоте оцифровки 100 кГц), при нормировке не уменьшаются и оказываются существенно выше соседних значений. Период и распределение весов скользящего среднего может требовать незначительной корректировки в ходе эксперимента в зависимости от конкретных параметров источника звука, характеристик волновода, расстояния. Однако принцип сохраняется — пропустить короткие импульсы прямого сигнала и значительно ослабить длинные импульсы отраженного. При грамотной программной реализа-

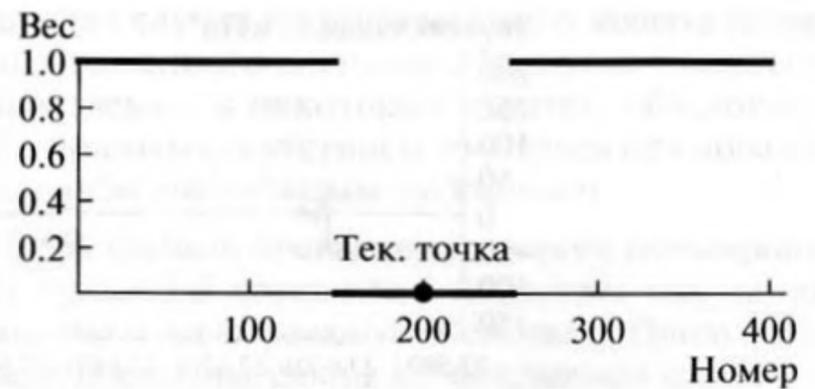


Рис. 2. Распределение весов при вычислении скользящего среднего зеркальной производной сигнала.

ции вычисление подобного вида взвешенного скользящего среднего не требует значительных вычислительных затрат.

Для определения момента регистрации взрыва датчиком необходимо отслеживать превышение нормированной зеркальной производной сигнала некоторого порогового значения, например, 20. Пороговое значение следует выбирать таким образом, чтобы максимально уменьшить вероятность ложного срабатывания, т.е. принятия отраженного сигнала за прямой. При этом неизбежно снизится вероятность правильного обнаружения, которую, однако, можно повысить неалгоритмическими методами — сокращением расстояний, увеличением мощности зарядов и т.д. Значение порога равно 20 обеспечивает вероятность ложного срабатывания на уровне 1% для имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных.

На рис. 3 приведен пример обработки сигнала, полученного в ходе натурального эксперимента летом 2014 г. на акватории Ладожского озера. С помощью нахождения зеркальной производной сигнала и ее нормировки удалось отфильтровать отраженный сигнал, в то время как фронт прямого усилен и легко определяется с помощью пороговой процедуры. Алгоритм, реализующий данный метод, имеет низкую вычислительную сложность, что позволяет использовать его в системах реального времени на базе портативных устройств. Приведем в краткой форме данный алгоритм:

1) центровка сигнала: $S_i = S_{i+1} - \frac{1}{n} \sum_{j=-n/2}^{n/2-1} S_{i+j}$, где S — отсчет сигнала, n — период скользящего среднего;

2) нахождение зеркальной производной сигнала: $D_i = |S_i| - |S_{i-1}|$;

3) если $D_i < 0$, то обнулить D_i ;

4) усреднение последовательных положительных значений зеркальной производной D ;

5) вычисление взвешенного скользящего среднего значения зеркальной производной: $W_i = \sum_{j=-k/2}^{k/2-1} (A_{i+j} w_j) / (k - 100)$, где k — период

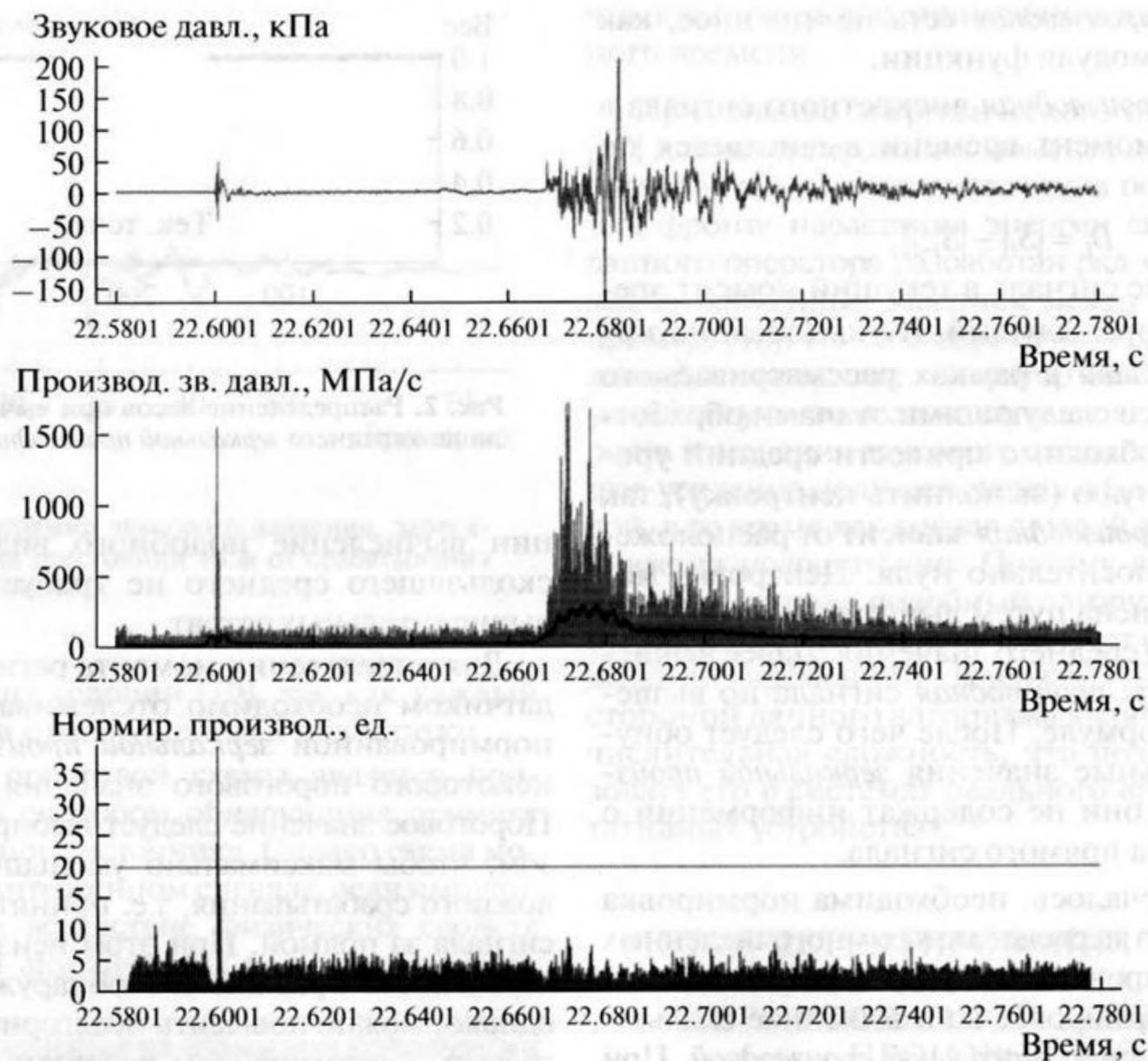


Рис. 3. Фрагмент сигнала от импульсного источника, записанного в ходе эксперимента (вверху); положительные значения зеркальной производной и их взвешенное скользящее среднее (в середине); нормированная зеркальная производная (внизу).

скользящего среднего, A — среднее значение положительной зеркальной производной, w_j — набор весов при вычислении скользящего среднего

$$(рис. 2), w_j = \begin{cases} 1, & j \in [-k/2, -51]; \\ 0, & j \in [-50, 49]; \\ 1, & j \in [50, k/2 - 1]; \end{cases}$$

б) нормировка зеркальной производной на ее взвешенное скользящее среднее значение: $N_i = A_i / W_i$;

7) определение момента регистрации взрыва датчиком: если $N_i > p$, то $T = i$, где p — принятый порог обнаружения, T — момент времени прихода прямого сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Описанный метод детектирования импульса прямого сигнала был применен при обработке данных натурных экспериментов, указанных выше. Эксперименты выполнялись при следующих гидрологических условиях: глубина волновода составляла 120–130 м; профиль дна ровный; профиль скорости звука показан на рис. 4; глубина ис-

точников составляла 15–20 м; глубина приемников 2.8 м; расстояния от источников излучения до приемников составляли 200–300 м. Масса взрывчатого вещества источников составляла 1 кг в тротиловом эквиваленте.

Необходимо отметить ограничение применимости данного метода, которое связано с положительным значением зеркальной производной на участке убывающего от нуля в отрицательную область сигнала. Отрицательная фаза сигнала, которая образуется при отражении его от верхней границы волновода, имеет положительную зеркальную производную, так что отрицательная фаза сигнала может быть принята за начало импульса прямого сигнала. При расположении приемника у поверхности воды (в проведенных опытах 2.8 м) временная задержка между положительной и отрицательной фазами сигнала невелика и не вносит существенной погрешности в рассчитанные координаты взрыва. Но в случае расположения приемника на глубине 15 м и более данный метод нуждается в дополнительных корректировках.

Используя разработанный метод, были определены временные задержки прихода импульсов прямого сигнала на датчики. Корректность полу-

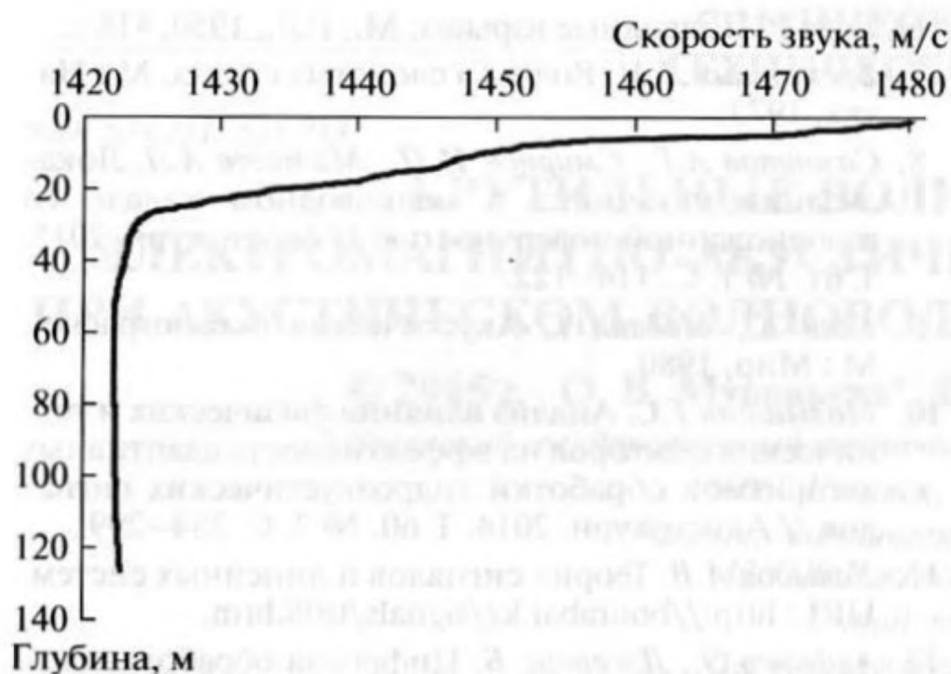


Рис. 4. Профиль скорости звука на участке акватории Ладожского озера в момент проведения натуральных экспериментов.

ченных задержек проверялась вручную путем визуального просмотра записей экспериментов. Обобщенные результаты обработки приведены в таблице. Для сравнения эффективности разработанного метода с ранее известными был произведен такой же расчет по методам на основе производной сигнала и ТКЕО. Критериями выбора методов для сравнения являются их принципиальная однотипность и малая вычислительная сложность, позволяющая использовать их в системах реального времени на базе портативных устройств. Результаты обработки также приведены в таблице. Пороговые значения обнаружения импульса выбраны таким образом, чтобы обеспечить вероятность ложного срабатывания на уровне 1%.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что разработанный метод детектирования импульса прямого сигнала показал свою работоспособность при решении поставленной задачи. При вероятности ложного срабатывания 1% разработанный метод обеспечивает обнаружение импульсов прямого сигнала с вероятностью 88%

(включая случаи одновременного захвата прямого и отраженного сигнала). Пропуски импульсов, наблюдаемые в некоторых опытах, обусловлены либо полным отсутствием импульса прямого сигнала, либо его сильным затуханием.

В 9% случаев превышение порога нормированной зеркальной производной возникает как на прямом, так и на отраженном сигнале. Однако если между последовательными подрывами существует регламентированный временной промежуток, имеется возможность игнорировать второе и последующие превышения порога обнаружения (относящиеся к отраженному сигналу) в течение некоторого временного интервала после первого превышения.

По сравнению с методом на основе производной сигнала разработанный метод имеет на 26% большую чувствительность при обнаружении слабого прямого сигнала (меньше пропусков импульсов). Это является существенным преимуществом при приеме сигналов с больших расстояний и, соответственно, их естественном затухании.

Сравнение разработанного метода с методом на основе ТКЕО показывает, что на 41% уменьшилось количество случаев одновременного захвата прямого и отраженного сигнала в тех ситуациях, когда имеется сильный отраженный сигнал. Это обстоятельство становится весомым, когда необходимо определить координаты нескольких последовательных подрывов с заранее неизвестной периодичностью. В таких условиях отраженный сигнал от первого взрыва может быть принят за прямой сигнал от следующего взрыва, что приведет к ошибкам определения координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод детектирования импульса прямого сигнала основан на его ключевой характеристике, а именно, крутом фронте нарастания акустического давления. Суть метода состоит в вычислении зеркальной производной сигнала и ее специальной нормировке, что позволило достичь

Результаты детектирования импульса прямого сигнала методами на основе зеркальной производной, производной сигнала и ТКЕО

	Зеркальная производная	Производная сигнала	ТКЕО
Общее количество записей сигналов от подводных взрывов	318	318	318
Правильное определение фронта импульса	251 (79%)	249 (78%)	229 (72%)
Одновременный захват прямого и отраженного сигнала	30 (9%)	22 (7%)	51 (16%)
Пропуск импульса	34 (11%)	43 (14%)	34 (11%)
Обнаружение ложного импульса (отраженного)	3 (1%)	4 (1%)	4 (1%)

эффекта усиления слабого прямого сигнала и подавления сильного отраженного.

Описанный метод применен к имеющимся записям натуральных испытаний. В связи с нехарактерным даже для летнего сезона прогревом слоев воды на многих записях прямой сигнал испытывал сильное затухание, а иногда вообще не доходил до приемников. Однако применение разработанного метода позволило при вероятности ложного срабатывания 1% детектировать 88% импульсов прямого сигнала.

Анализ результатов обработки экспериментальных данных приводит к выводу, что предложенный метод детектирования импульса прямого сигнала эффективен при решении поставленной задачи. Отмечены преимущества метода по сравнению с известными аналогичными. Низкая вычислительная сложность алгоритма, лежащего в основе разработанного метода, позволяет использовать его в системах реального времени на базе портативных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Ю.С., Агейкин А.В., Коротаев Ю.В., Черепанов Е.О. Дистанционная оценка координат срабатывания импульсного источника в водной среде в условиях интервальной неопределенности измерений координат точек приема сигнала // Ученые записки физфака. МГУ. 2014. № 6. С. 146323.
2. Ferguson B.G., Lo K.W. Localization of small arms fire using acoustic measurements of muzzle blast and/or ballistic shock wave arrivals // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 132. № 5. P. 2997–3017.
3. Gebbie J., Siderius M., McCargar R., Allen J.S., Pusey G. Localization of a noisy broadband surface target using time differences of multipath arrivals // J. Acoust. Soc. Am. Express Letters. 2013. V. 134. № 1. P. EL17–EL83.
4. Olson J.V., Szuberla C.A.L. Processing infrasonic array data / In Handbook of Processing in Acoustics. Ed. Havelock D., Kuwano S., Vorlander M. New York: Springer, 2008. V. 2. P. 1487–1496.
5. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. М.: Физматлит, 2008.
6. Коул Р. Подводные взрывы. М.: ИЛ., 1950. 418 с.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
8. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л. Локализация источника в мелководном канале со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 114–122.
9. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980.
10. Малышкин Г.С. Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 3. С. 284–299.
11. Давыдов А.В. Теория сигналов и линейных систем. URL: <http://bourabai.kz/signals/ts08.htm>.
12. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. 2-е изд. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
13. Chen L., Liu Y., Kong F., He N. Acoustic source localization based on generalized cross-correlation time-delay estimation // Procedia Engineering. 2011. V. 15. P. 4912–4919.
14. Knapp C.H., Carter G.C. The generalized correlation method for estimation of time delay // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1976. V. ASSP-24. № 4. P. 320–327.
15. Carter G.C. Coherence and time delay estimation // Proc. IEEE. 1991. V. 75. P. 236–255.
16. Govindan R.B., Raethjen J., Kopper F., Claussen J.C., Deuschl G. Estimation of time delay by coherence analysis // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2005. V. 350. № 2–4. P. 277–295.
17. Kaiser J.F. On a simple algorithm to calculate the energy of a signal / International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1990. P. 381–384.
18. Boudraa A.O., Cexus J.C., Abed-Meraim K. Cross ψ_B -energy operator-based signal detection // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 123. № 6. P. 4283–4289.
19. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
20. Шелестов А., Житомирская К., Ильин Н., Кременецкий И. Автоматическое выявление ударных волн по измерениям спутника ACE / Proceedings of XIII-th International Conference “Knowledge-Dialogue-Solution”. Varna, 2007. V. 2. P. 599–606.