

УДК 534.2; 519.6

КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК И СЕЛЕКТИВНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ В ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ю.А. Половинка

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук¹

Импульсные сигналы используются для связи, навигации и томографии в подводной акустике, применяются в системах акустического неразрушающего контроля неоднородных сред и дистанционных измерениях турбулентности, скорости ветра и температуры в атмосфере. Точность акустических методов зависит, как от аппаратной точности измерений, так и от применяемых алгоритмов обработки акустических сигналов. В работе предложен вариант импульсного способа измерений функции отклика акустического канала, включающий коррекцию ошибок в получаемых данных, а также селективное сопровождение во времени и точное измерение отдельных импульсных приходов. Способ реализуется применительно к потоку блоков данных акустического зондирования, где каждый блок представляет оцифрованные значения импульсной функции отклика акустического канала. Алгоритм реализации способа включает контроль правильности данных и коррекцию ошибочных блоков в потоке, селективное выделение, сопровождение и точное измерение времен прихода конкретных импульсов. Определение и коррекция ошибочных блоков осуществляется по заданному уровню коэффициента взаимной корреляции данных в соседних блоках. Идентификация, селективное выделение и сопровождение во времени импульсов в измеренных функциях отклика выполняются путем поиска локальных максимумов и расчета евклидова расстояния между всеми локальными максимумами в следующих друг за другом блоках данных и построения конкретных траекторий, соединяющих максимумы, в соответствии с условием минимального расстояния между максимумами в соседних блоках. Измерение времен прихода конкретных импульсов проводится путем выборки значений вдоль рассчитанных траекторий. Численная реализация способа выполнена в среде программирования MATLAB. Для тестирования способа и программ использовались экспериментальные данные импульсного зондирования в Японском море, полученные в лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН в 2005–2012 годах.

Способ позволяет повысить точность и автоматизировать процесс измерений времен распространения импульсных акустических сигналов и может быть реализован в технических системах и устройствах, использующих амплитудно-временные принципы измерений физических величин.

ВВЕДЕНИЕ

Технические системы и устройства, использующие импульсные амплитудно-временные методы, применяются в подводной и атмосферной акустике, в медицине и для неразрушающего контроля в условиях неоднородных сред. Точность измерений физических величин для таких систем и устройств обусловлена надежностью идентификации и определения времен прихода акустических импульсов в условиях многолучевого распространения и зависит от характеристик аппара-

туры и алгоритмов обработки результатов измерений. Так, в случае использования амплитудных компараторов точность определения момента времени прихода акустического импульса определяется заданным пороговым значением амплитуды, но из-за сложной формы импульса измеренное время может не совпадать со временем начала импульса. На практике, за счет пространственного расхождения и потерь в среде, в процессе распространения импульсного акустического сигнала уменьшается его амплитуда. Для поддержания

амплитуды сигнала при приеме постоянной используются системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Если в процессе распространения сигнала меняется его форма, что проявляется при распространении импульсов в ограниченных средах, применение АРУ или амплитудных компараторов с заданными порогами не позволяет с требуемой достоверностью выделять и идентифицировать импульсы и со-

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.:(423) 2311631. Факс: (423) 2312573. E-mail: yrivlad@poi.dvo.ru.

ответственно делает невозможным точное определение их времен прихода. Использование измерительных схем, в которых проводится идентификация импульсов в функции отклика канала (ФОК) по очередности их прихода, может эффективно применяться только в средах с постоянным числом импульсных приходов в ФОК, измеряемых последовательно во времени. В случае жидких и газообразных сред регистрируемое число импульсов в функциях отклика во времени изменяется. Физически изменчивость обусловлена флуктуациями параметров среды и неравенством фазовых скоростей различных мод в области распространения импульсных акустических сигналов. В общем случае, в процессе распространения импульса в неоднородных и ограниченных средах происходит затягивание импульсных сигналов во времени, изменяется их форма, а также появляются реплики сигнала, связанные с отражениями от границ. Задача проведения импульсных измерений усложняется в неоднородных средах с зависящими от времени параметрами распространения. В этом случае времена приходов акустических импульсов не являются постоянными и изменяются как случайным образом за счет флуктуаций параметров среды, так и под воздействием гидродинамических процессов, определяющих условия распространения акустических волн. Предлагаемый способ позволяет проводить идентификацию импульсов и выполнять точные измерения их времен приходов в условиях высокой нестабиль-

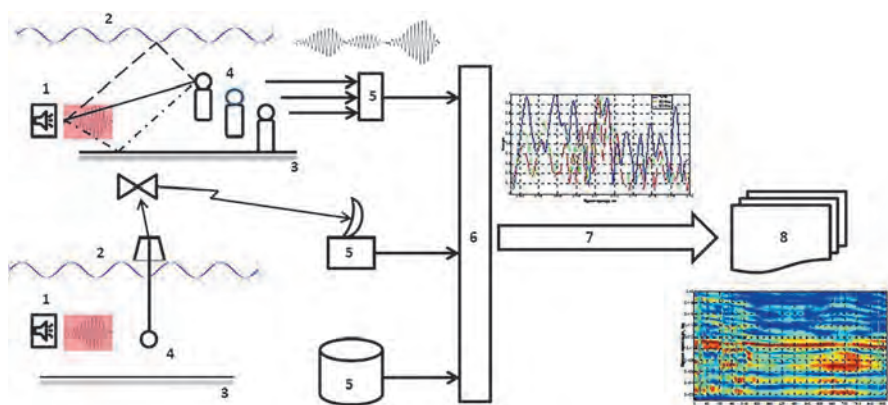


Рис. 1. Схема измерений ФОК и формирование потоков данных в задачах томографии, навигации и связи

ности амплитуд сигналов и изменчивости общего числа импульсов в ФОК.

■ Постановка задачи

На рис. 1 приведена схема формирования потоков блоков данных (измеренных значений ФОК во времени) для задач связи, навигации и томографии в подводной акустике.

Измерение параметров ФОК осуществляется путем излучения импульсных сигналов излучателями 1 и приема прошедших в среде и отраженных от поверхности 2 и дна 3 сигналов с помощью стационарных или подвижных приемных акустических датчиков 4. Электрические сигналы с датчиков преобразуются в цифровую форму и сохраняются в запоминающем устройстве 5. Затем с помощью вычислительного устройства 6 высокочастотный сигнал детектируют и определяют ФОК в виде зависимости огибающей принятых импульсных сигналов во времени. Соответствующие

цифровые значения полученной зависимости представляют собой одиночный блок данных – 7. ФОК, измеренные последовательно, через заданный промежуток времени формируют поток блоков данных во времени – 8.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты измерений ФОК, полученные при проведении экспериментов по тестированию методик томографии и навигации в Корейском проливе [1].

Измерения ФОК выполнялись с периодичностью один раз в минуту. На рис. 2, а представлены в графическом виде 1-й, 450-й и 920-й цифровые блоки акустических данных, полученные в 1-ю, 450-ю и 920-ю минуты эксперимента. На рис. 2, б изображен цифровой поток данных с 1-й по 920-ю минуты эксперимента. На графике видны временные интервалы, где наряду с плавными изменениями функции отклика акустического канала во времени происходят значительные искажения ФОК. При этом наблюдается как

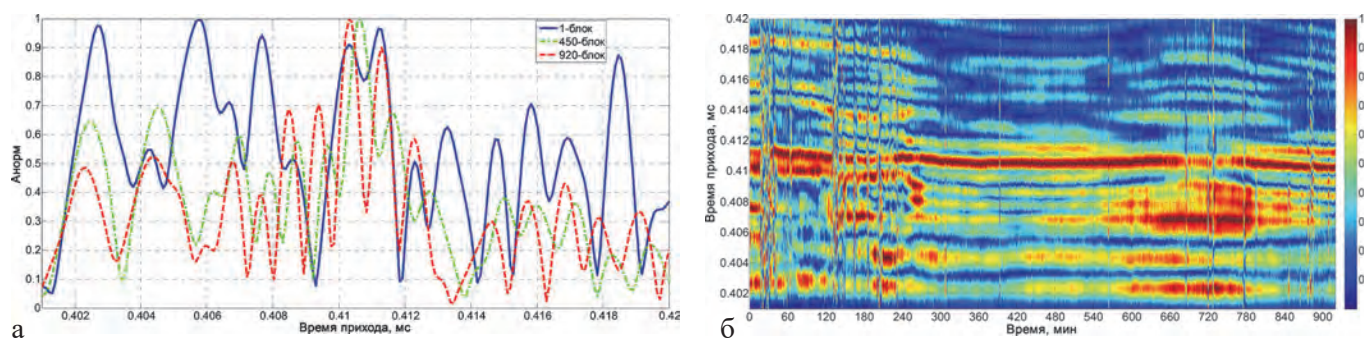


Рис. 2. Функции отклика акустического канала: а – для одиночных зондирований в начале, середине и в конце эксперимента; б – вариации ФОК в течение времени эксперимента [1]

изменчивость амплитуд для каждой измеренной ФОК (рис. 2, а), так и вариации всех времен приходов импульсов в течение времени эксперимента (рис. 2, б). Задачей данной работы являлось повышение точности и автоматизация измерений параметров импульсных сигналов для потоковых данных акустического зондирования.

■ Реализация способа и алгоритм расчета

Для решения поставленной задачи предложен способ измерения структуры импульсной ФОК в неоднородной среде во времени [2]. Схема реализации способа приведена на рис. 3.

Способ включает получение оцифрованных значений импульсных функций отклика $h_i(k)$ в виде потока блоков данных, расчет максимального значения функции взаимной корреляции K_{corr} между соседними блоками данных в соответствии с выражением:

$$K_{corr} = \max_j \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h_i(k) \times h_{i+1}(k-j) \right], \quad (1)$$

где i – номер блока, N и k – соответственно общее количество значений и номер отсчета функции отклика канала, j – значение лага при расчете функции взаимной корреляции. Затем выполняется поиск ошибочных блоков в соответствии с критерием $K_{corr} < \rho$, где ρ – заданный уровень статистической корреляции данных в соседних блоках. Коррекция данных осуществляется путем замены ошибочных блоков на ближайшие, не содержащие ошибок, блоки данных. После коррекции осуществляется измерение времен прихода и амплитуд импульсных сигналов в блоках. Для этого определяются положения и величины локальных максимумов в текущем блоке информации. Одновременно производится сжатие информационного объема данных в блоках за счет замены дискретной функции отклика канала $h_i(k)$ ограниченным набором ее максимальных значений

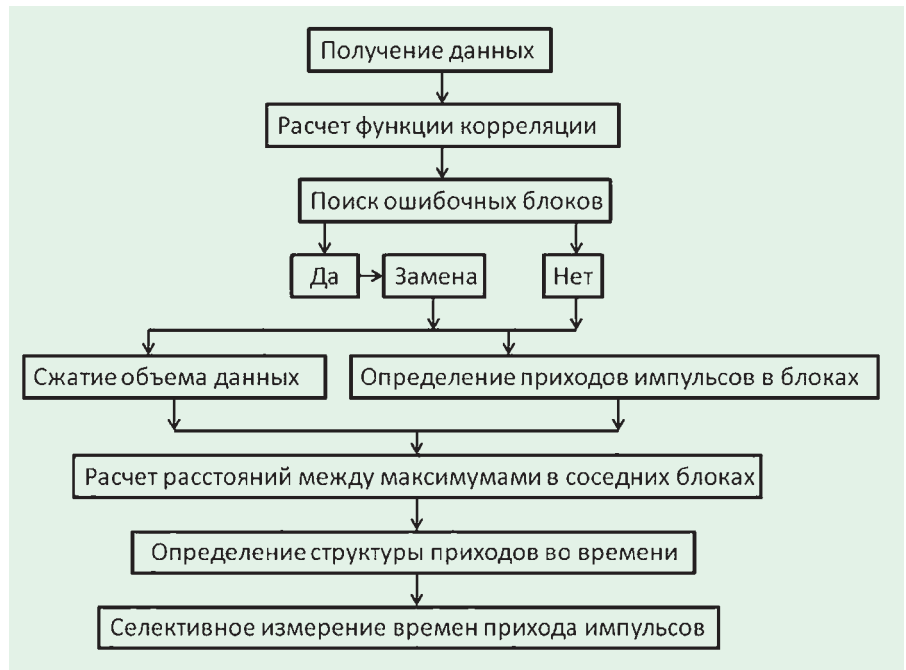


Рис. 3. Блок-схема реализации способа измерения структуры импульсной ФОК во времени

$M_i(m, del) = \max[h_i(k)]$, где m – номер максимума в блоке, del – положение максимума в блоке (время прихода импульса). Для измерения времен прихода конкретных импульсных сигналов во времени выполняется расчет двумерного евклидова расстояния $S_{i,i+1,m}$ между всеми максимумами $A_{m,i}$ в следующих друг за другом блоках данных согласно выражению:

$$S_{i,i+1,m} = \sqrt{1 + (A_{m,i+1} - A_{m+1,i})^2} \quad (2)$$

Далее строится структура импульсной функции отклика во времени путем выбора траекторий $L_{i,i+1,m}$, соединяющих максимумы $A_{m,i}$ в соответствии с критерием минимальных значений двумерного евклидова расстояния $S_{i,i+1,m}$ между максимумами в соседних блоках данных:

$$L_{i,i+1,m} = \min\{S_{i,i+1,m}\}. \quad (3)$$

Измерения времен прихода осуществляют выборкой значений вдоль структурных траекторий, соответствующих конкретным импульсным сигналам. На рис. 4 приведена схема алгоритма расчетов реализации предлагаемого метода.

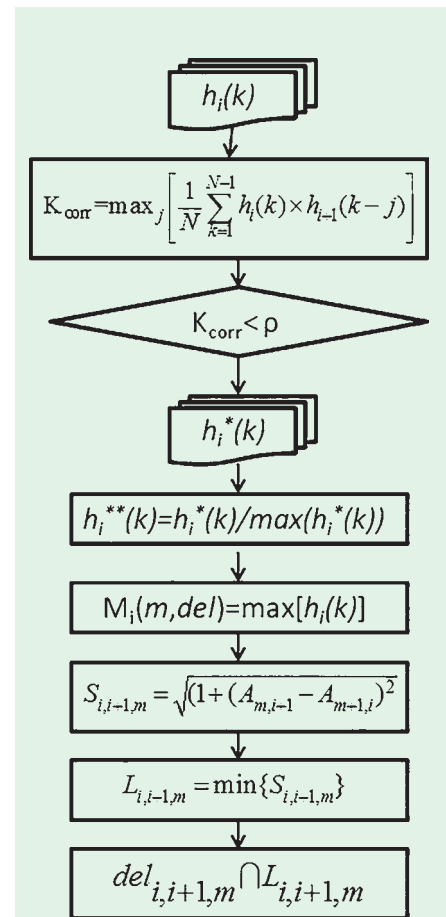


Рис. 4. Схема алгоритма расчета структуры ФОК во времени

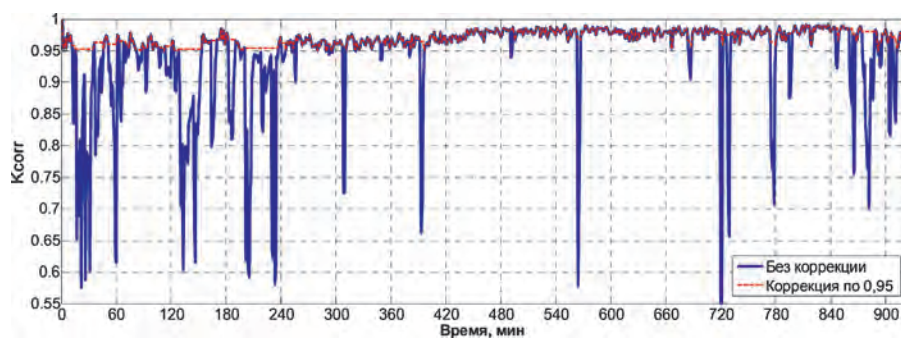


Рис. 5. Зависимость коэффициентов корреляции между соседними блоками данных в течение времени эксперимента: синий — без коррекции, красный — с коррекцией

Реализация алгоритма расчета выполнена в среде программирования MATLAB© фирмы MathWorks©, версия R2013b (8.2.0.701), 64-bit (License Number 854460) с использованием функций параллельных вычислений CUDA на GPU NVIDEO GeForce GTX670 [3,4].

■ Тестирование способа и программ расчета

Для тестирования способа и программ использовались данные экспериментальных измерений функций отклика акустического канала в Корейском проливе [1], полученные в лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН и представленные на рис. 2. Оценка степени искажения информации в принимаемом потоке блоков данных проводится на основании расчета и анализа коэффициентов взаимной корреляции $K_{\text{сорт}}$ (рис. 5) между соседними по времени блоками данных.

Поиск и удаление ошибочных блоков в потоке выполняются в со-

ответствии с условием $K_{\text{сорт}} < 0,95$. Из вида зависимости, представленной на рис. 5, следует наличие как кратковременных, так и более продолжительных периодов уменьшения $K_{\text{сорт}}$ ниже уровня 95%. Анализ внешних условий в течение эксперимента свидетельствует о том, что причиной кратковременных периодов уменьшения корреляции между соседними блоками являлось ухудшение соотношения сигнал-шум в принимаемых сигналах при проходе маломерных судов различных типов. Более длительные периоды снижения корреляции в блоках акустических данных в первые четыре часа и заключительные два часа эксперимента связаны с увеличением уровня окружающих шумов под влиянием приливно-отливных течений, что подтверждается данными измерений уровня моря на ближайшей к месту эксперимента приливной станции. Численное значение ρ , на основании которого выполняется коррекция блоков акустической информации, может варьироваться в зависимости от характеристик подводного звукового канала, ги-

дрофизических процессов в водной среде и параметров зондирующих сигналов. Указанный критерий может прогнозироваться и должен выбираться для технических систем с учетом статистических закономерностей пространственно-временной изменчивости ФОК в конкретных водных акваториях [5, 6].

Результаты коррекции первичных данных, приведенных на рис. 2, б, по критерию 95%-й корреляции ФОК представлены на рис. 6.

В варианте обработки, результаты которой изображены на рис. 6, а, замена не соответствующих критерию блоков проводилась на предыдущий, соответствующий критерию блок данных. Эта методика может использоваться при коррекции потоковых данных акустического зондирования в системах реального времени. В варианте обработки, результаты которой изображены на рис. 6, б, замена не соответствующих критерию блоков проводилась путем интерполяции «правильных» блоков данных в начале и конце интервала коррекции. Эта методика может применяться для обработки архивных данных или для уточнения результатов, полученных в режиме реального времени, но с задержкой по времени. Программный контроль наличия и восстановление ошибочных информационных блоков в первичных данных акустического зондирования [3] является универсальным средством, позволяющим обеспечить непрерывность процесса последующей цифровой обработки принимаемых импульсных сигналов в акустиче-

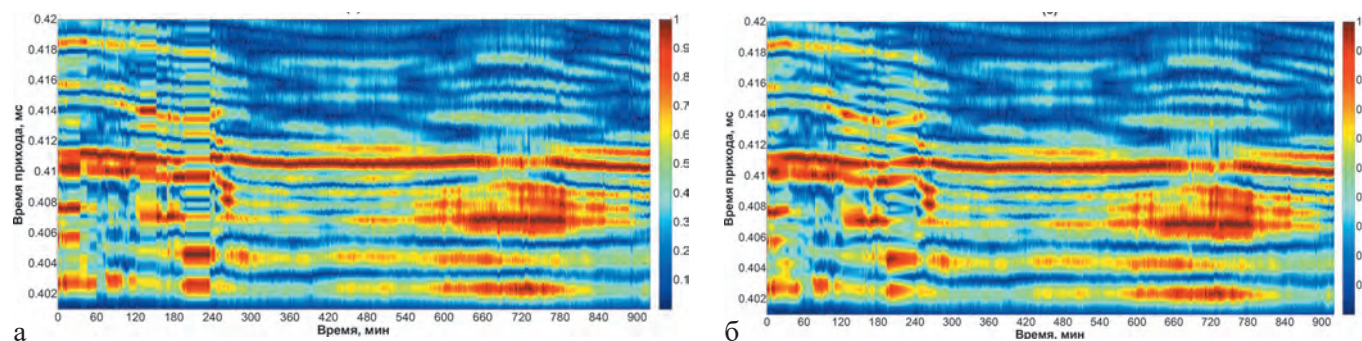


Рис. 6. Функции отклика акустического канала, измеренные в Корейском проливе после коррекции путем: а — «замены блоков»; б — «линейной интерполяции блоков»

ских системах, использующих результаты измерений ФОК.

Функции отклика акустических каналов могут иметь достаточно много максимумов (импульсных приходов). Для мелководных акваторий их число может быть десять и более (рис. 2, а). На первой стадии селективного выделения и сопровождения во времени импульсных сигналов [4] выполняется поиск максимумов, определение их амплитуд и положения (времени прихода) в ФОК (рис. 7).

Практически решается задача численного поиска локальных максимумов функции одной переменной, с дополнительным ограничением на минимальный уровень амплитуд, выше которого производится поиск максимумов. Указанное ограничение имеет физический смысл уровня шума в системе. Локальные максимумы с амплитудами ниже этого уровня не рассматриваются (рис. 7, а). На данном этапе обработки, наряду с поиском локальных максимумов, выполняется сжатие информации путем замены дискретных значений функции отклика канала $h_i(k)$ на ограниченное число ее максимальных значений, $A_i(\text{no}, \text{del}) = \max[h_i(k)]$ (рис. 7, б), где i – номер блока, no – номер максимума в блоке, del – положение максимума в блоке (время прихода импульса). Применение процедуры поиска локальных максимумов к прошедшим коррекцию (рис. 6, б) блокам данных позволяет построить распределения времен приходов для максимумов амплитуд $\{A_i\}$ и номеров максимумов в блоках

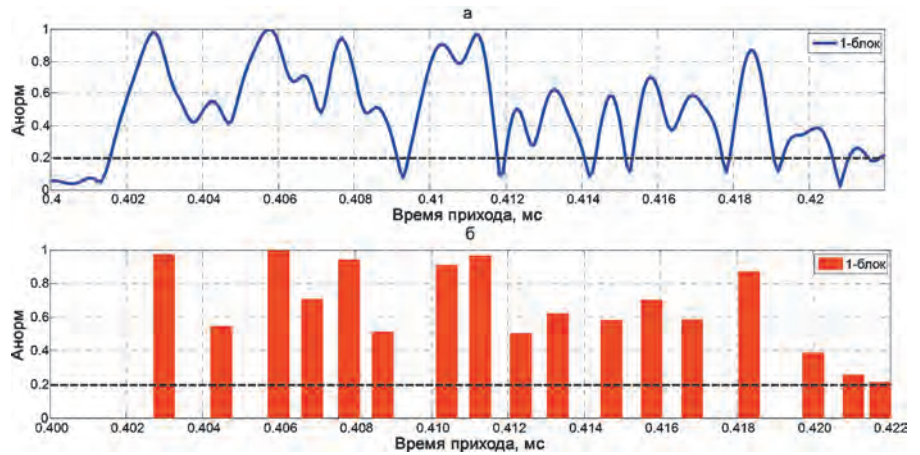


Рис. 7. Измерения ФОК в Корейском проливе: 1-й блок цифровой информации (а) и результат численного определения локальных максимумов (б)

$\{\text{no}_i\}$ в течение времени эксперимента (рис. 8).

Цвета точек на рис. 8, а соответствуют максимумам амплитуд приходов в диапазонах: красный – от 1 до 0,85, фиолетовый – от 0,85 до 0,7, зеленый – от 0,7 до 0,6, желтый – от 0,6 до 0,5, голубой – от 0,5 до 0,4, синий – от 0,4 до 0,3, черный – от 0,3 до 0,2. Номера максимумов приходов в блоках на рис. 8, б соответствуют цвету точек: 1-й приход – синий, 2 – зеленый, 3 – красный, 4 – голубой, 5 – фиолетовый, 6 – салатный, 7 – синий и далее цвета повторяются. Представленные в графическом (точечном) виде результаты обработки рис. 8, а, б показывают, что отследить структуру распределения максимумов, соединив точки одного типа в виде плавных кривых, невозможно как для амплитудной дискриминации, так и при использовании методики «привяз-

ки» следящих фильтров к номерам максимумов в блоках. Амплитудная дискриминация позволяет выделить относительно стабильную и плавную структуру изменчивости во времени только одного прихода (в диапазоне 0,41–0,412 мс), рис. 8, а. При сопровождении во времени максимумов по их номерам приходов в ФОК (рис. 8, б) структура приходов сохраняется на всем периоде времени измерений (за исключением одного скачка в середине второго часа измерений) только для первого и второго приходов. Применение методики идентификации и сопровождения локальных максимумов амплитуд ФОК во времени по их номерам оправданно только для группы первых 2–3 максимумов из-за того, что общее количество регистрируемых локальных максимумов в ФОК значительно варьируется за время наблюдений. В рассматриваемом случае

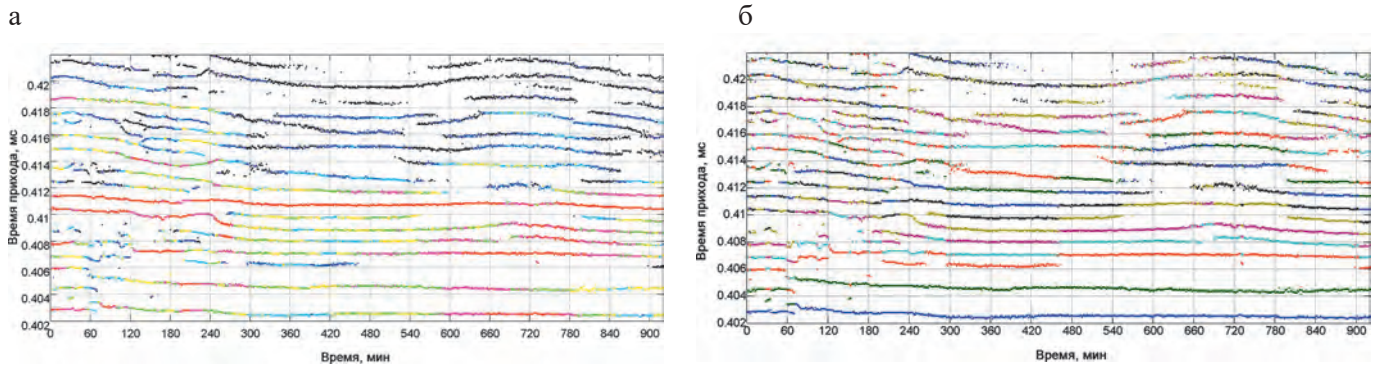


Рис. 8. Максимумы амплитуд $\{A_i\}$ (а) и номера максимумов в блоках $\{\text{no}_i\}$ (б) как функции времен прихода и времени эксперимента

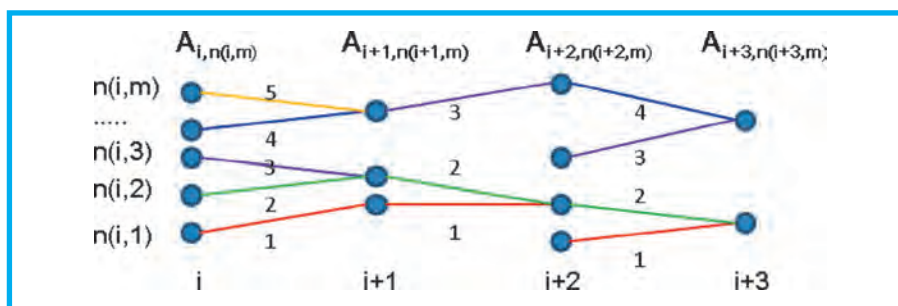


Рис. 9. Схема представления структуры приходов ФОК во времени



количество локальных максимумов варьируется в пределах от 9 до 20 в течение времени эксперимента. По методикам выделения и сопровождения сигналов с максимальной амплитудой (рис. 8, а) и по сопровождению заданного (как правило, первого) приходящего импульса (рис. 8, б) работают системы подводной навигации и дальнометрии. В задачах акустической томографии и мониторинга во времени гидрофизических процессов требуются идентификация и сопровождение во времени как можно большего числа импульсов с возможностью отслеживать структурные процессы появления, объединения и исчезновения этих импульсов в ФОК. Для решения указанных задач предлагается использовать алгоритм поиска траекторий, соединяющих положения локальных максимумов, по критерию минимума евклидова расстояния между соседними по времени ФОК (или соседними блоками информации). Точки максимумов в следующих друг за другом блоках данных соединяются отрезками прямых линий в соответствии с критерием:

$$L_{n,k} = \min \left\{ \left| A_{i,n(i,k)} - A_{i,n(i+1,k)} \right| \right\} \quad (4)$$

На рис. 9 приведена схема представления структуры приходов ФОК во времени путем построения траекторий, соединяющих локальные максимумы амплитуд по критерию минимума евклидова расстояния в соответствии с выражением (4).

Результаты расчета и структурного представления данных,

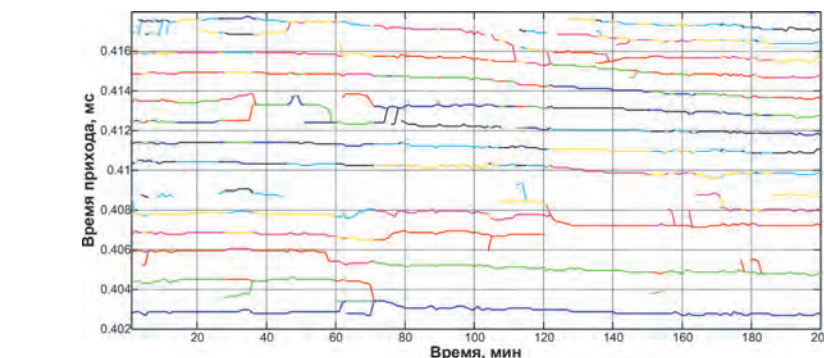


Рис. 10. Представление структуры импульсных приходов во времени [1] в виде траекторий, соединяющих локальные максимумы амплитуд ФОК по критерию минимума евклидова расстояния

изображенных в точечном виде на рис. 8, в соответствии с критерием (4) и схемой рис. 9 приведены на рис. 10.

Цвета линий на рис. 10 соответствуют: синий – максимумам 1-го прихода, зеленый – 2-го, красный – 3-го, фиолетовый – 4-го, желтый – 5-го, голубой – 6-го, черный – 7-го и т.д. Физически критерий (4), который используется для построения траекторий положений локальных максимумов во времени (рис. 10), основан на предположении более высокой стабильности времен приходов акустических импульсов по сравнению с изменчивостью во времени амплитуд (рис. 8, а) или порядковых номеров (рис. 8, б) приходящих импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ коррекции ошибок, сжатия объема данных, селективного сопровождения импульсных приходов, отображения структурных процессов появления, объединения и исчезновения им-

пульсных приходов во времени во входном потоке данных измерений функций отклика звукового канала, позволяющий на основании этого выполнять точное измерение времен приходов импульсных сигналов. Ввиду устойчивости к внешним шумовым и техногенным помехам способ может применяться в качестве составной части комплексной цифровой обработки сигналов в акустических системах подводной навигации, связи, томографии и мониторинга динамических процессов в водных акваториях, в системах акустического неразрушающего контроля неоднородных сред и дистанционных измерениях турбулентности, скорости ветра и температуры в атмосфере.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории акустической томографии ТОИ ДВО РАН за предоставленные данные экспериментальных измерений.

Работа выполнена с частичной поддержкой грантов НШ 6084.2014 и ДВО РАН 12-III-A-07-124.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стробыкин Д.С. Акустическая томография прибрежной зоны в Корейском проливе» / Стробыкин Д.С., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Войтенко Е.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Кушнир П.Г. // Акустика океана: Докл. XIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. 2-5 июня 2011 г. М.: ГЕОС, 2011. С. 285-288.

2. Заявка 2015101859 Российская Федерация, МПК8 G 06F 5/00, 11/00. Способ измерения структуры импульсной функции отклика во времени в неоднородной среде / Половинка Ю.А.; Федеральное государственное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН) (RU) - № 2015101859; заявл. 15.01.2015.

3. Свидетельство № 2014611493 Российская Федерация. Коррекция ошибок в потоковых данных импульсного акустического зондирования водной среды : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Ю. А. Половинка; заявитель и правообладатель Федеральное государственное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН) (RU) - № 2013661482; заявл. 11.12.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.02.2014. - [1] с.

4. Свидетельство № 2014611494 Российская Федерация. Селективное выделение и сопровождение во времени импульсных сигналов в подводных акустических волноводах : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Ю. А. Половинка; заявитель и правообладатель Федеральное государственное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН) (RU) - № 2013661484; заявл. 11.12.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.02.2014. - [1] с.

5. Половинка Ю.А. Использование статистических методов обработки при измерении времен приходов импульсных сигналов в условиях многолучевого распространения / Половинка Ю.А., Моргунов Ю.Н., Буренин А.В., Стробыкин Д.С., Азаров А.А., Лебедев М.С. // Четвертая Всероссийская Научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана»: Материалы конференции. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 257-261.

6. Yang T.C. Measurements of temporal coherence of sound transmission through shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 2006. No 120(5). P. 2595-2614.