

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

Ю.В. Матвиенко, А.В. Каморный, Ю.А. Хворостов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Для приемных систем, содержащих комбинированные скалярно-векторные приемники звука, предложена модель обработки данных, обеспечивающая определение углового положения и обнаружение движущегося источника широкополосного шума, основанная на условии стабильности угловых характеристик потока энергии, формируемого источником. Модель обработки основана на вычислении углового распределения суммарных уровней потоков энергии, приходящих из узкого горизонтального сектора. Энергетический детектор выделяет угловые сектора, в которых уровень энергии превышает среднее значение по всему горизонту. При низком соотношении сигнал/помеха модель предполагает предварительную нормализацию спектральных компонент высокого уровня исходного сигнала и его временное усреднение.

Модель обработки реализована в компьютерной программе. Приведены примеры обработки программой экспериментальных данных по источнику широкополосного шума при различных соотношениях сигнал/помеха.

ВВЕДЕНИЕ

В системах контроля подводной обстановки очень перспективны комбинированные скалярно-векторные приемники (СВП) звука, совмещающие в одном корпусе как обычные приемники давления или скалярные приемники (СП), так и приемники колебательной скорости. Достоинства и недостатки первичных датчиков звуковой энергии такого типа подвергнуты тщательному анализу во многих публикациях [1–5]. Бесспорным является вывод о более высокой помехоустойчивости приемных трактов с СВП в сравнении с обычными гидрофонами [3]. Количественная оценка этого выигрыша представляется разными авторами по-разному, но всегда определяется структурой действующей помехи, значение которой может быть снижено за счет возможности управления характеристикой направленности приемника [4–5].

Методы решения задачи обнаружения при приеме шумовых

сигналов неизвестной структуры в системах, использующих комбинированные приемники, фактически не отличаются принципиально от систем с гидрофонами и основаны на применении энергетического приемника-интегратора и сравнении выходного сигнала со сформированным порогом. Но при построении обнаружителей с СВП необходимо учитывать, что законы распределения энергетических параметров звукового поля соответствуют распределению Лапласа [6].

Однако комбинированные приемники обладают рядом уникальных возможностей, использование которых может значительно увеличить их эффективность в системах обнаружения слабых шумовых сигналов:

во-первых, из-за возможности увеличения отношения сигнал/помеха на выходе системы обработки не только за счет когерентного сложения и накопления энергии сигнала, но и дополнительного его увеличения за счет возможности

уменьшения действующей помехи. Последнее реализуется или увеличением времени обработки в случае, если структура помехи близка к изотропной, или формированием направленного приема для подавления анизотропной помехи с ярко выраженным пространственным положением;

во-вторых, из-за возможности определения углового положения источника сигнала из одной точки в широкой полосе частот и соответственно формирования дополнительных сведений при принятии решений об обнаружении сигнала, включающих контроль устойчивости расчетных угловых характеристик по наблюдаемому частотному диапазону и закономерному изменению угловых характеристик во времени на основе предполагаемой модели движения объекта.

С учетом этих обстоятельств процедура решения задачи обнаружения движущегося источника

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел.: 8 (423) 2226416. E-mail: ymat@marine.febbras.ru

широкополосного шума не должна сводиться только к контролю и пороговому обнаружению информативного параметра звукового поля, но должна учитывать всю информацию, доступную на заданном временном интервале. При этом важно, что для скалярно-векторных приемников более высокая помехоустойчивость и возможность увеличения дальности обнаружения дополняется способностью из одной точки определять направление на источник шумового сигнала, причем в широком частотном диапазоне.

■ Применение анализа время-углового распределения энергии для обнаружения шумового сигнала

В случае приема очень слабых широкополосных сигналов фактически СВП выполняет роль пространственного дискриминатора с распределением принимаемой энергии по пространственным направлениям. При этом задачу обнаружения можно решать на основе поиска экстремумов и анализа динамики время-углового прихода энергии в наблюдаемом частотном диапазоне с учетом того, что при движении источника широкополосного шума его энергия должна концентрироваться в определенном угловом секторе, а изменение во времени этого сектора должно соответствовать предполагаемой модели движения источника.

Кроме того, прием слабых сигналов источника обычно идет на фоне случайных помех достаточно высокого уровня, действующих как в спектральной полосе шумов источника, так и вне ее и отличающихся от полезных сигналов различными угловыми приходами. Поэтому задачу обнаружения на основе сравнения энергий выбранного углового сектора со средней энергией по про-

извольному направлению целесообразно решать с использованием предварительной нормализации входных сигналов за счет подавления спектральных компонент высокого уровня.

Решение задачи обнаружения и одновременно определения направления на источник при приеме неизвестного шумового сигнала системой, содержащей скалярно-векторный приемник, способный определять направление прихода энергии на каждой частоте наблюдаемого диапазона, основано на фильтрации полезного сигнала условием стабильности углового прихода на частотах, формирующих спектр излучения источника.

Первым шагом обработки является быстрое преобразование Фурье для получения комплексного спектра принимаемых сигналов по давлению и компонентам скорости.

Далее по спектрам выполняется расчет энергетических параметров и их развертка во времени – формирование трехмерных сонограмм, изображающих энергетические параметры в координатах «время–частота» с реализацией пороговых обнаружителей при накоплении данных. Помимо классических пороговых методов одним из перспективных направлений обработки сонограмм может стать выделение и анализ интерференционной структуры сигналов, регистрируемых приемником, в основе которых лежит когерентное накопление спектральной интенсивности (частотных смещений) волнового поля. Интерференционная картина сформирована движущимся источником и является результатом взаимодействия распространяющихся мод [7–8]. Классическая сонограмма – энергия в координатах «время–частота» фактически является ин-

тегральным показателем для всей принимаемой энергии, независимо от углов прихода, и может быть получена на основе обработки данных скалярного приемника. Эта сонограмма уже может служить объектом анализа при принятии решения об обнаружении сигнала. Для СВП в условиях высокого уровня изотропной помехи предпочтительнее анализировать сонограммы по компонентам вектора интенсивности.

Следующий шаг – расчет массива пеленгов для каждой частоты и формирование мгновенного углового распределения энергии для всех частот наблюдаемого диапазона путем суммирования энергий по каждому направлению. При приеме шумового сигнала превышение энергетического уровня в определенном угловом секторе над средним значением по всему горизонту является признаком обнаружения. Аналогично обработка выполняется и в последующие моменты времени с формированием развертки полученного распределения во времени. В итоге от классической энергетической сонограммы «время–частота» переходим к трехмерной сонограмме время-углового распределения (ВУР) с изображением принимаемой энергии в координатах «частота–угол прихода в горизонтальной плоскости», определенной с заданным усреднением.

На следующем этапе выполняется обработка угловых сонограмм детектором энергетического превышения. В детекторе реализуется алгоритм, обеспечивающий срабатывание обнаружителя при заданной степени превышения энергий по доминирующему направлению над пороговым значением во всем исследуемом диапазоне углов обзора. Итогом обработки являются: показатель превышения энергии выделенного углового сектора над

средним по горизонту, взвешенная оценка пеленга на источник шума, выделенные параметры спектрального состава сигнала, формирующие совокупную энергию по принятому направлению.

На конечном этапе отслеживаются изменения сформированных оценок во времени и принимается решение об обнаружении источника с определением пеленга на него и спектрального состава его шума.

■ Примеры обработки реальных данных

Обратимся далее к результатам обработки натурного эксперимента. Экспериментальные данные были получены в мелководной акватории приемной системой, содержащей одиночный СВП, при движении источника шумовых сигналов на удаление. Данные содержали запись акустического давления и компонент колебательной скорости, а также текущего времени и углового положения приемника.

На небольших дальностях источника от приемной системы решение задачи его обнаружения предложенным способом не представляет трудностей из-за высокого уровня сигнала от него. Для этого случая на рис. 1 приведен фрагмент экспериментальных данных в виде энергетических сонограмм

звукового давления и горизонтальных компонент вектора интенсивности, имеющих классический вид. Палитра изображения определяет синий цвет фактически как уровень шумовой помехи.

На рис. 2, а для фрагмента представлена расчетная сонограмма время-углового прихода энергии по результатам обработки всех частот наблюдаемого диапазона,

а на рис 2, б – конечный итог обработки – детектирование по заданному порогу и определение интегральной оценки направления прихода энергии. Фактически по обработке каждого пакета данных длительностью 1 с и с шагом 1 с фиксируется обнаружение шумящего источника, причем на исследуемом фрагменте вероятность правильных решений составляет

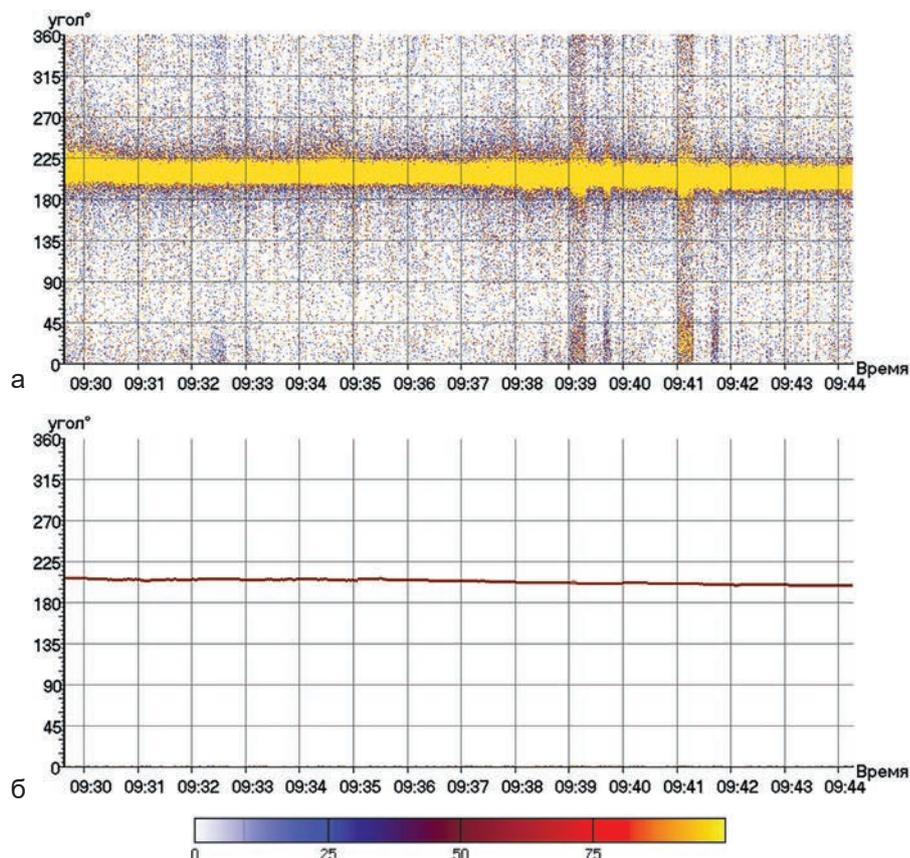


Рис. 2. Результаты обработки сильного шумового сигнала: а – сонограмма время-углового распределения энергии сигнала; б – итог обработки: устойчивое отслеживание источника по вычисленному пеленгу на него с вероятностью правильного обнаружения сигнала 99,5%

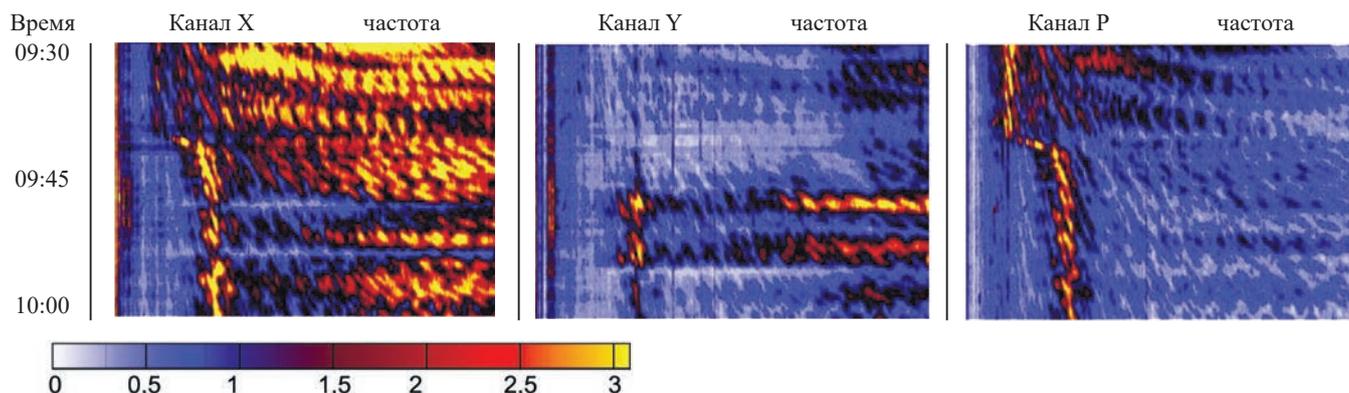


Рис. 1. Сонограммы частотно-временного распределения энергии сильного шумового сигнала

99,5%. Кроме того, одновременно с обнаружением определяется с минимальной дисперсией и пеленг на источник (выделенная линия на рис. 2, б).

При значительном удалении источника от приемной системы его сигнал становится очень слабым. Временной фрагмент экспериментальных данных, соответствующий такому случаю, в виде сонограмм частотно-временного распределения энергии шумового сигнала источника в масштабе (палитре) рис. 1 представлен на рис. 3.

Для этого фрагмента прямое применение предлагаемого метода на основе расчета сонограммы время-углового распределения энергии (представлена на рис. 4) для обнаружения и определения направления на источник не обеспечивает надлежащей достоверности и однозначности решений по обнаружению и угловому положению шумового источника сигнала из-за высокой дисперсии данных.

Сонограмму (рис. 4) необходимо дополнительно обработать с применением известных процедур нормализации (отбеливания) энергетических спектров и накопления выходных данных.

Последовательность обработки при нормализации односекундных

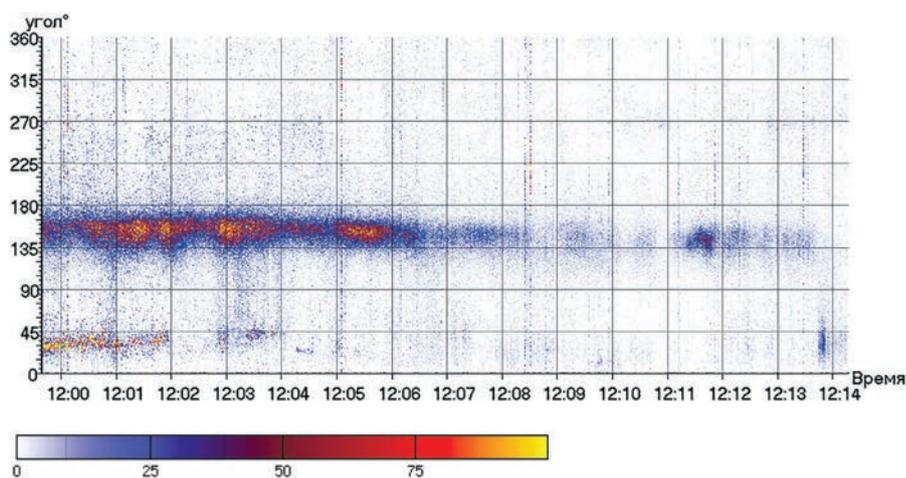


Рис. 4. Сонограмма время-углового распределения энергии слабого шумового сигнала

реализаций сигнала поясняется рис. 5 и 6 для различных временных интервалов.

После процедуры нормализации эффект накопления на выходе детектора при обработке данных в различные моменты времени (с различным уровнем сигнала) показан на рис. 7 при интегрировании за 5, 10 и 30 с.

Как видно из рис. 6, 7, в графических зависимостях «угол прихода–энергия» без нормализации сильных дискрет наблюдаются регулярные случайные срабатывания высокой энергетике. Они, в свою очередь, значительно завышают среднее значение энергии и, как следствие, уменьшают вероятность обнаружения полезного сигнала. Поэтому процедура нормализации

(отбеливания) данных представляется необходимой для дальнейших расчетов.

После применения операций нормализации и интегрирования к данным, время-угловое распределение которых представлено на рис. 4, получим результат обнаружения и определения направления на источник, изображенный на рис. 8.

Для реализации предложенной и описанной выше модели обработки разработана программа MonitorWave, в которой в качестве исходных выступают полученные от СВП данные векторных каналов (X, Y, Z) и скалярного канала давления (P), а также информация об ориентации комбинированного приемника в пространстве.

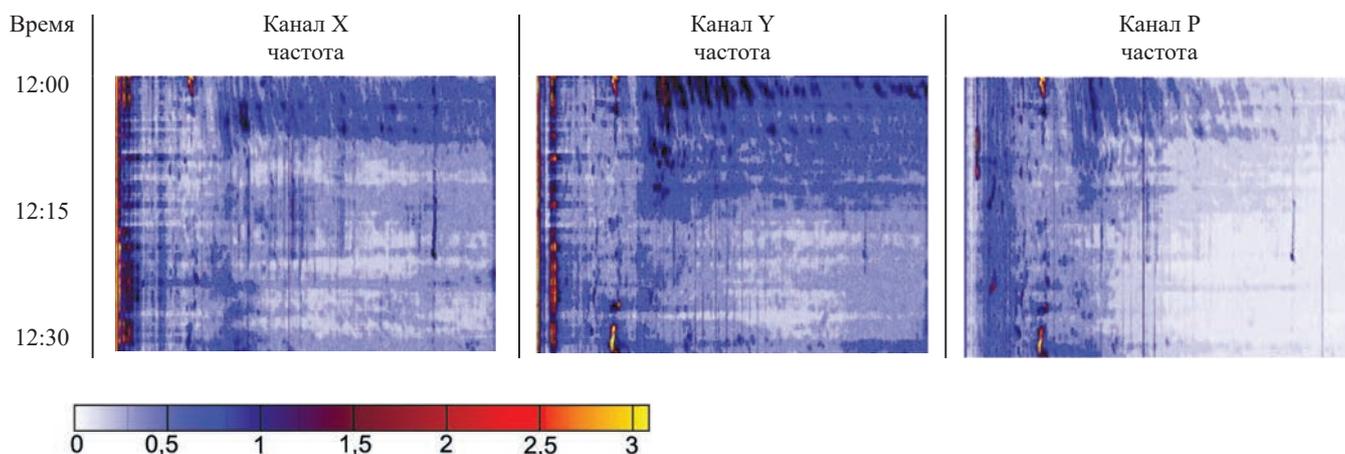


Рис. 3. Сонограммы частотно-временного распределения энергии слабого шумового сигнала

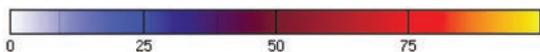
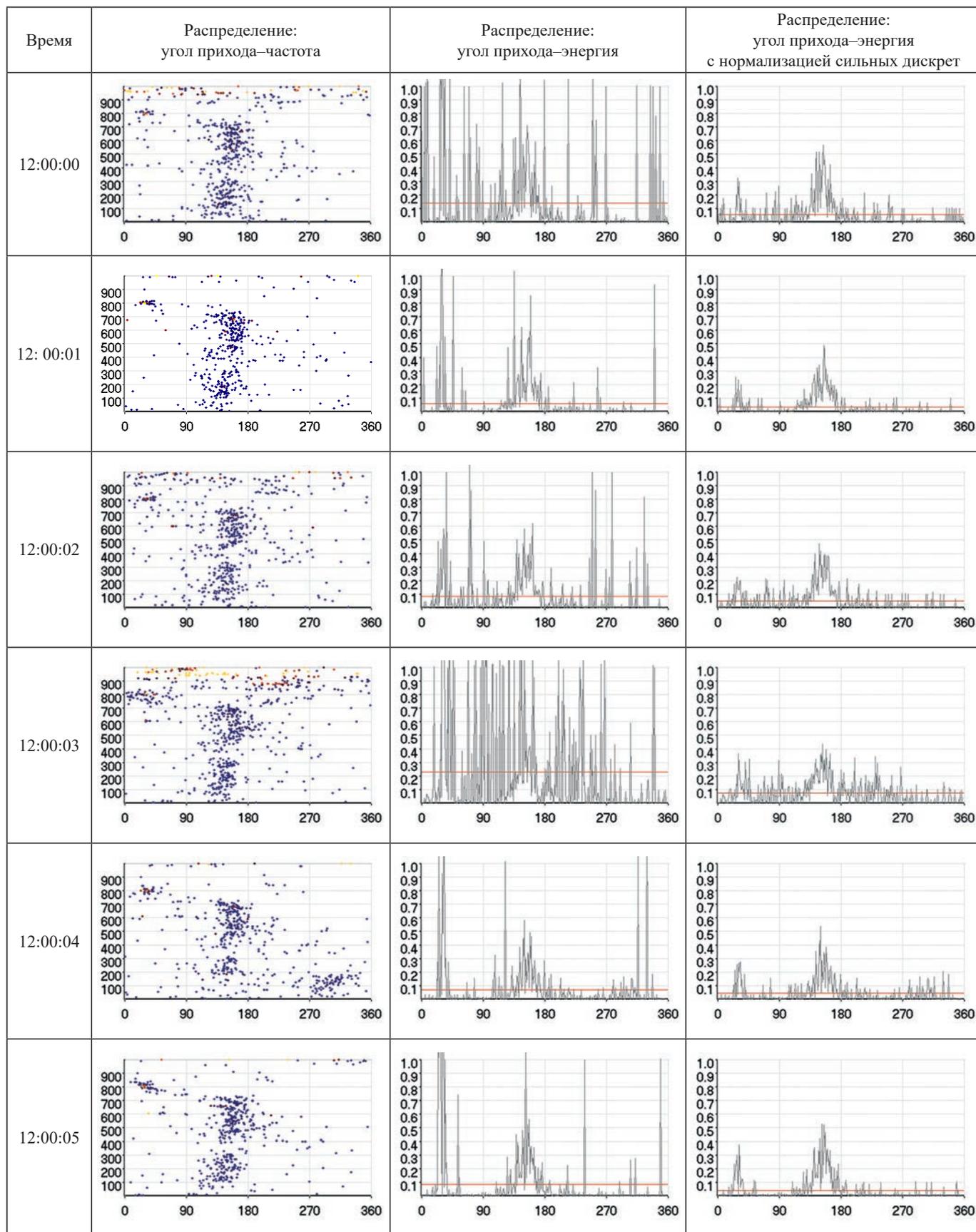


Рис. 5. Преобразование сигнала с использованием процедуры нормализации при шаге по времени 1 с

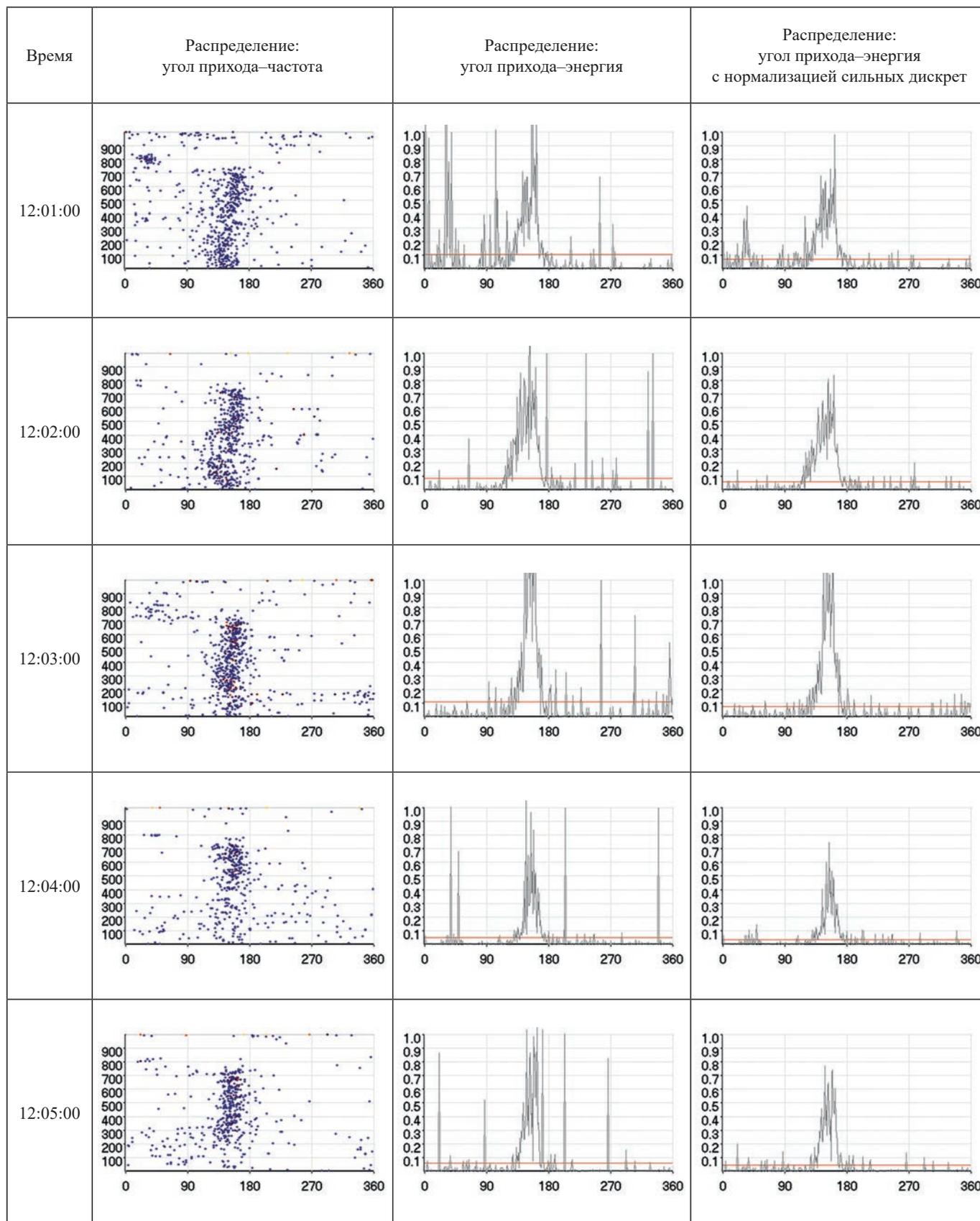
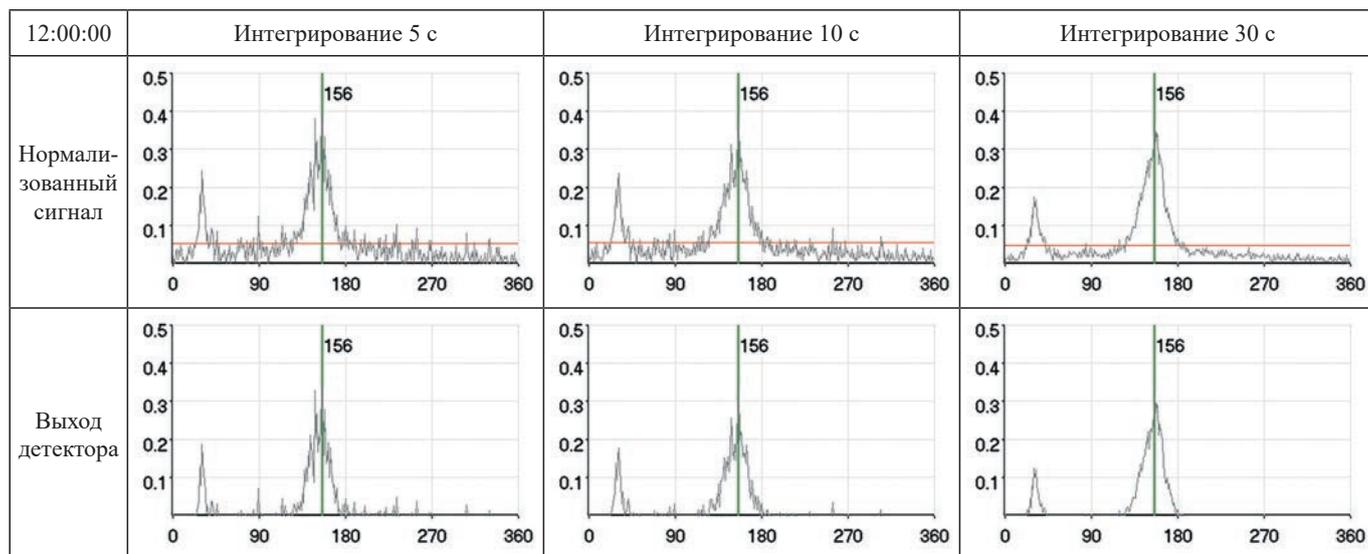
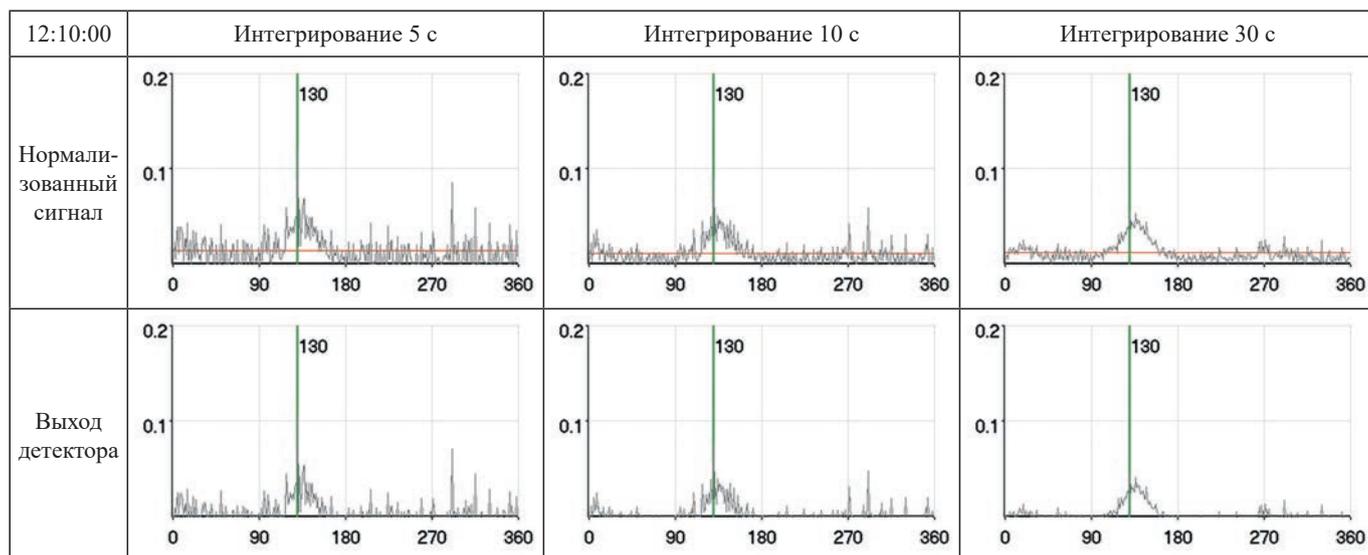


Рис. 6. Преобразование сигнала с использованием процедуры нормализации при шаге по времени 60 с



а



б

Рис. 7. Выход детектора при обработке слабых шумовых сигналов для различного времени накопления: а – в момент времени 12:00:00; б – в момент времени 12:10:00

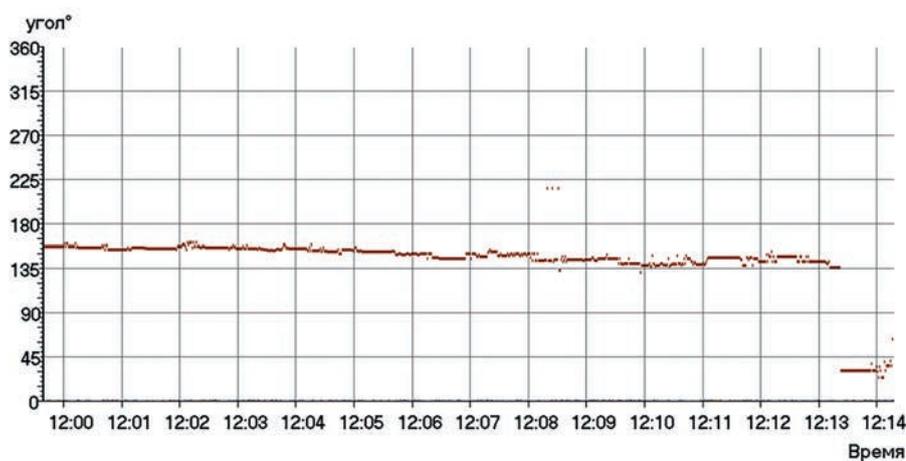


Рис. 8. Результат обнаружения и определения углового положения источника

В заключение отметим, что путем обработки реальных экспериментальных данных приемной системы, содержащей комбинированный скалярно-векторный приемник, обеспечивается решение двух классических задач обнаружения и определения направления на источник шума. Эффективность предложенного алгоритма подтверждается результатами обработки экспериментальных данных в условиях контролируемого движения источника шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуруп В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
2. Каришнев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А. Обнаружение и оценка координат шумового источника в мелком море с использованием скалярной или скалярно-векторной антенны и согласованной фильтрации // Гидроакустика. 2014. № 20. С. 74–80.
3. Смаришев М.Д. О помехоустойчивости комбинированного акустического приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 4. С. 558–559.
4. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006, 194 с.
5. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.А., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 5. С. 774–785.
6. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Мальцев А.М., Харахашьян А.М. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов одиночным скалярно-векторным модулем // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 44–49.
7. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 4. С. 406–418.
8. Переселков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. Применение векторно-скалярного приемника для локализации движущегося источника звука в океаническом волноводе // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Физика. Математика. 2017. № 1. С. 39–56.

