ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 534.6, 51.73 PACS: 43.30.Xm 43.30.Vh, 43.30.Wi

Алгоритмы обработки радиофизических сигналов для систем дистанционного мониторинга в гидросфере

В. А. Смирнов, Н. Н. Скворцова, Г. А. Максимов, В. А. Ларичев, Д. А. Смагин, В. М. Лекомцев

Рассмотрено применение алгоритмов корреляционного и спектрального анализа для радиофизических сигналов с целью точного позиционирования систем дистанционного мониторинга в гидросфере. Первичное тестирование и отладка разработанных алгоритмов измерения акустических дистанций были проведены в акустическом бассейне. Устройства для дистанционного мониторинга были испытаны в Черном море как в стационарных условиях с пирса, так и при движении буксировочным судном. Представлен результат позиционирования системы, полученный с помощью разработанных алгоритмов, по измеренным акустическими дистанциям и произведена оценка ошибки позиционирования. Показано, что измерение акустических дистанций при использовании разработанных алгоритмов отвечает требованиям для позиционирования систем морской 3D-сейсморазведки.

Ключевые слова: гидроакустика, мониторинг, морская сейсморазведка, позиционирование, корреляционный анализ, спектральный анализ.

Ссылка: *Смирнов В. А., Скворцова Н. Н., Максимов Г. А., Ларичев В. А., Смагин Д. А., Лекомцев В. М.* // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 85.
Reference: V. A. Smirnov, N. N. Skvortsova, G. A. Maksimov, V. A. Larichev, D. A. Smagin, and V. M. Lekomcev, Prikl. Fiz., No. 5, 85 (2019).

Введение

Исследование дна морей и океанов в научных целях на данный момент является важной и перспективной задачей и в основном производится с помощью современных погружаемых в воду технических средств: подводных роботов, донных и буксируемых антенн, подводных маяков и буев. Для корректного управления таким устройством под водой необходимо знать его текущее местоположение. Оснащение акселерометрами и датчиками давления позволяет косвенными методами вычислять текущее расположение устройств, но точность таких методов невелика, и они не могут быть использованы при длительном погружении.

Задача позиционирования системы является одной из первоочередных для обработки данных сейсмических измерений. Нерегулярная ошибка позиционирования может привести к невозможности анализа большого количества измерений, полученных большим количеством трудозатрат (в виде дорогостоящего оборудования, судов и персонала).

Сегодня большинство погружаемых устройств является автономными, а их подза-

Смирнов Виталий Александрович[1,2,3], вед. инженер.
Скворцова Нина Николаевна[1,2,4], в.н.с., д.ф.-м.н.
Максимов Герман Адольфович[3,4], нач. отдела, д.ф.-м.н.
Ларичев Владимир Андреевич[3], н.с., к.ф.-м.н.
Смагин Дмитрий Анатольевич[3], нач. отдела.
Лекомцев Владимир Митрофанович[3], нач. отдела, к.т.н.
[1] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119111, Москва, ул. Вавилова, 38.
[2] Российский технологический университет.
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.
[3] Акустический Институт ГНЦ
им. Академика Н. Н. Андреева.
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, 4.
[4] Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ».
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
E-mail: Viperx15@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2019 г.

© Смирнов В. А., Скворцова Н. Н., Максимов Г. А., Ларичев В. А., Смагин Д. А., Лекомцев В. М., 2019

рядка в морских условиях может оказаться невозможной. В таких условиях заряд батареи становится ценным ресурсом, грамотный расход которого во многом определит успех эксплуатации разработанного оборудования. В настоящее время после появления систем глобальной навигации (GPS, ГЛОНАС и др.), а также с развитием элементной базы появилась возможность использовать разнообразие радиофизических подходов для решения задач позиционирования в условиях малого энергопотребления.

Известные промышленные системы позиционирования для задач сейсморазведки сложно перестраивать с использованием быстро развивающейся современной элементной базы. В настоящее время основным толчком к развитию отечественных систем позиционирования систем морской 3D-сейсморазведки [1] будет возможность реализовать новые алгоритмы для обработки сигналов, причём на более мощных и одновременно обладающих более низким энергопотреблением микроконтроллерах.

В данной работе будет рассмотрена задача позиционирования автономных погружаемых в воду на различную глубину устройств (акустических транспондеров), которые являются частью буксируемой системы для морской 3D-сейсморазведки [2, 3]. Эта задача решается путем измерения взаимных дистанций между ними с помощью акустических сигналов с известными характеристиками и вычислений геокоординат каждого акустического транспондера относительно нескольких буксируемых маяков GPS с известными координатами. Дистанция вычисляется путем измерения времени распространения прямого луча акустического сигнала от источника к приемнику.

Анализ таких сигналов производится методами корреляционного и спектрального детектирования, поэтому важной задачей является развитие, адаптация и поиск новых численных алгоритмов обработки данных радиофизических сигналов для систем дистанционного мониторинга в гидросфере.

Экспериментальный стенд в акустическом бассейне

В Акустическом институте им. Академика Н. Н. Андреева тестирование алгоритмов обработки и детектирования акустических сигналов для задач позиционирования проводились в специально созданном акустическом бассейне.

В акустическом бассейне было заглублено 6 прототипов устройств акустических транспондеров на расстояниях от 4 до 12 метров друг от друга на глубине 4 м. Была произведена серия из 100 измерений. Каждый транспондер излучал тональный сигнал длительностью 2 мс. Частотный диапазон излучения устройств составляет набор из 16 дискретных частот (48–63 кГц) с шагом 1 кГц. Каждый транспондер производил излучение одной частоты с индексом, соответствующей его идентификатору. Сигналы оцифровывались с частотой дискретизации 135 кГц. Разрядность АЦП составляет 12 бит.

Акустическая антенна транспондера является направленной [4–7] и имеет основное направление приема, локализованное в горизонтальной плоскости. При этом использовалась круговая диаграмма направленности (ДН). Система буксируемых сейсмокос [8] для большинства задач буксируется на постоянной и одинаковой для всех устройств глубине, круговая ДН приемника позволит усилить полезный прямой сигнал от других транспондеров и подавить отражения от дна, поверхности, а также шумы.

Сигналы, измеренные всеми устройствами для одного из измерений, начиная с момента излучения до полного затухания всех отражений, и корреляционные функции принятого сигнала со всеми принимаемыми частотами представлены на рис. 1. Каждым устройством излучалась частота с индексом, соответствующим их идентификатору. Соответственно транспондер № 2 излучал 2-ю частоту (индексация от 0) 50 кГц, № 3 – 51 кГц и т. д.

Получение характеристик сигналов производилась адаптированными методами спектрального и корреляционного анализов, представленными в [9, 10]. На рис. 1, *б* и 1, *в* видно, что, несмотря на сильное искажение большинства сигналов, корреляционные функции пяти основных принимаемых частот в приемных каналах имеют выраженные максимумы, но из-за отражений от стенок бассейна, шумов и реверберации в соседних частотных каналах наблюдается флуктуационный

уровень корреляции, сопоставимый с уровнем полезного сигнала, (так, на рис. 1, *в* – сильный сигнал в 9-м частотном канале создает уровень корреляции в 10-м канале, сопоставимый с уровнем корреляции полезного сигнала). Наблюдается наложение и размывание максимумов взаимнокорреляционных фуккций, а также появление на этих функциях дополнительных максимумов. Например, на рис. 1, *б* максимумы dt9 и dt14 перекрываются, а максимум dt13 находится на уровне акустического шума.

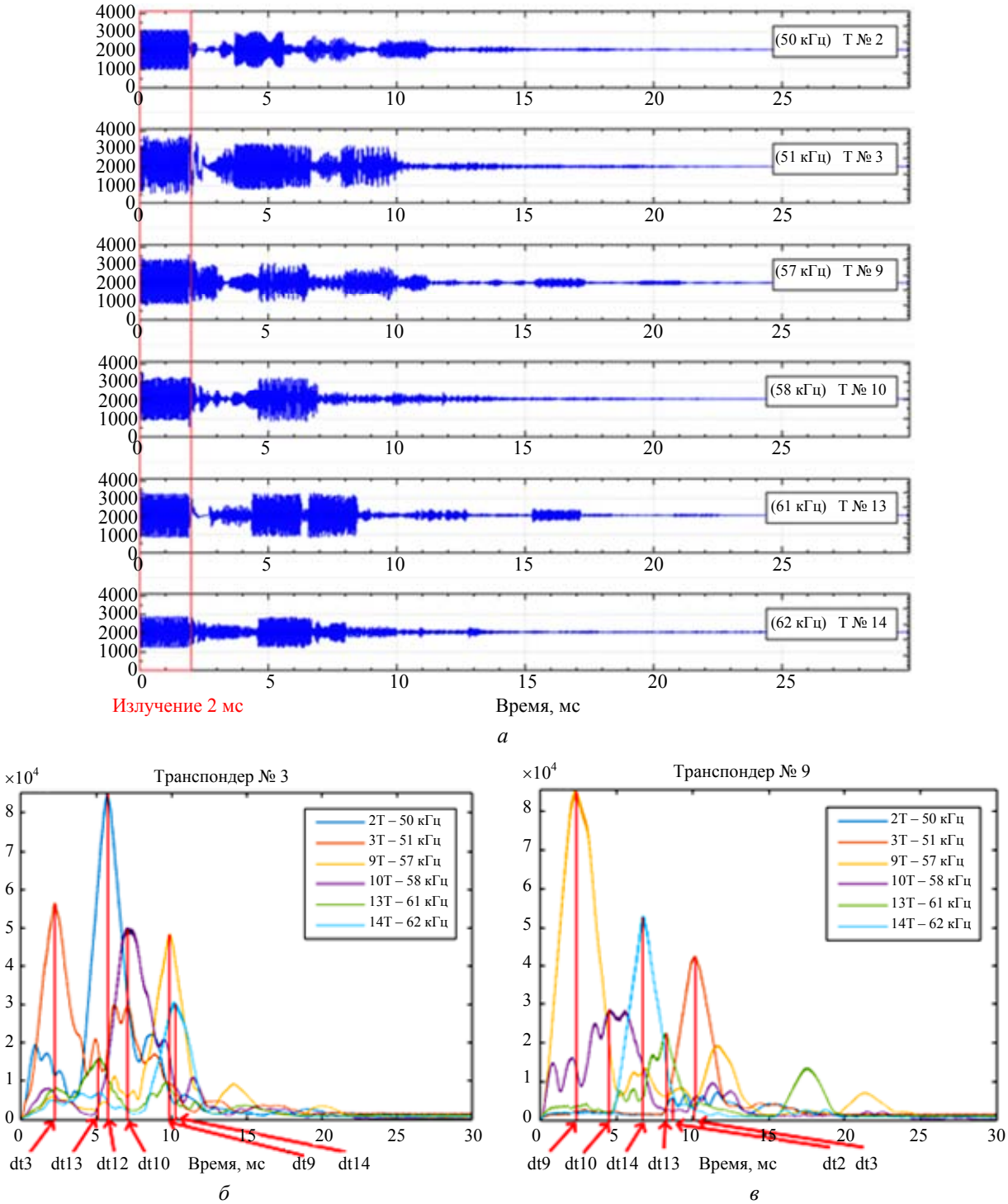


Рис. 1. Акустические сигналы и их обработка: а – временные выборки излученных (2 мс) и принятых сигналов в акустическом бассейне 6 транспондерами; б, в – взаимные корреляционные функции принятого сигнала с исходным излученным импульсом на каждой частоте (16 частот) для транспондеров № 3 (б) и № 9 (в). Временной сдвиг максимумов взаимнокорреляционных функций относительно нуля соответствует времени распространения сигнала в среде. dt – измеренные задержки времени распространения сигнала до i-го транспондера.

Заметим, что в акустическом бассейне невозможно одновременное тестирование более 5–6 прототипов устройств акустических транспондеров.

Натурные испытания системы на Черном море

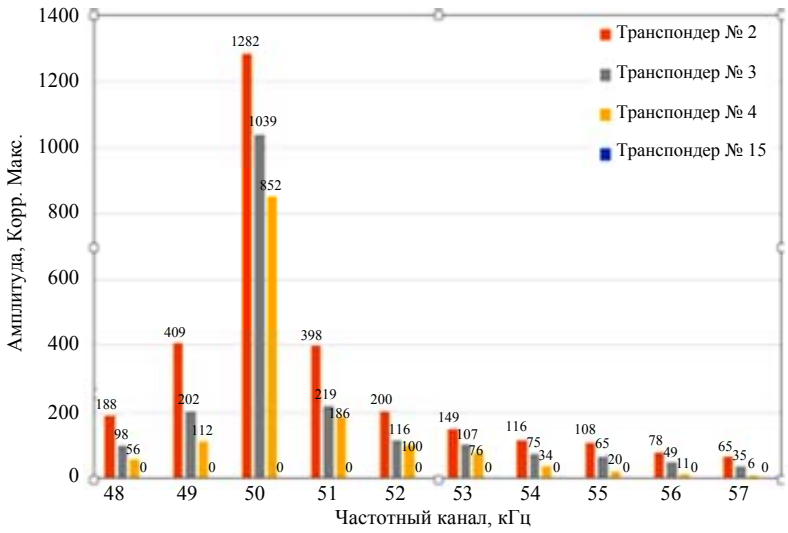
Серия экспериментов по измерению излучения, дистанций и позиционирования была произведена с 17.06.18 по 19.06.18 в Голубой бухте.

Первый эксперимент проводился с системой из 4 транспондеров, которая была развернута с пирса. Для проверки правильности конфигурации системы было произведено одно тестовое измерение, при котором излучение производилось одним транспондером № 2 (на частоте 50 кГц), в то время как все остальные осуществляли прием 10 частот от 48 кГц до 57 кГц с шагом 1 кГц (0–9 частотный индекс). На рис. 2, *а* приведена схема расположения транспондеров на косе, а на рис. 2, *б* максимумы взаимнокорреляционных функций в 10 приемных каналах. Видно, что максимальный уровень приема наблюдается на 2-м транспондере за счет отражения собственного сигнала от дна/поверхности. Средний уровень приема наблюдается на элементах № 3 и № 4, транспондер № 15 не регистрирует превышение пороговых значений, т. к. находится на расстоянии более 200 м. Максимум корреляции в соседних частотных каналах ~1/5 от основного.*

Во втором эксперименте были выпущены в море на расстояние 300 м от пирса три косы, на каждой из которых было 4 транспондера. На концах кос были расположены 4 буксируемых маяка GPS. Тестовая серия акустических сигналов, записанных 12-ю транспондерами представлены на рис. 3. Из рис. 3, *а* видно, что в морских условиях наблюдается намного меньше отражений и реверберацией, чем в акустическом бассейне. Взаимнокорреляционные функции имеют ярко выраженные максимумы (см. рис. 3, *б*). Уровень корреляции отражений в соседних каналах не превышает уровня основных сигналов. На спектрограммах рис. 3, *в* видны выраженные спектральные полосы, превышающие уровень шума в 30 раз в моменты прихода сигналов.

* Прием осуществляется на близких частотах, таким образом, взаимная корреляция от сигнала с большой энергией в соседнем частотном канале может превысить уровень корреляции с основным сильно затухшим сигналом с бóльшей дистанции. При неправильной конфигурации системы (время и частота излучения) это приведет к ошибкам измерения расстояний.

а



б

Рис. 2. Эксперименты в Голубой бухте с 4 транспондерами на косе, развернутой с пирса: а – расположение транспондеров на косе; б – максимумы взаимнокорреляционных функций в приемных каналах транспондеров при излучении частоты с индексом 2 (50 кГц) транспондером № 2.

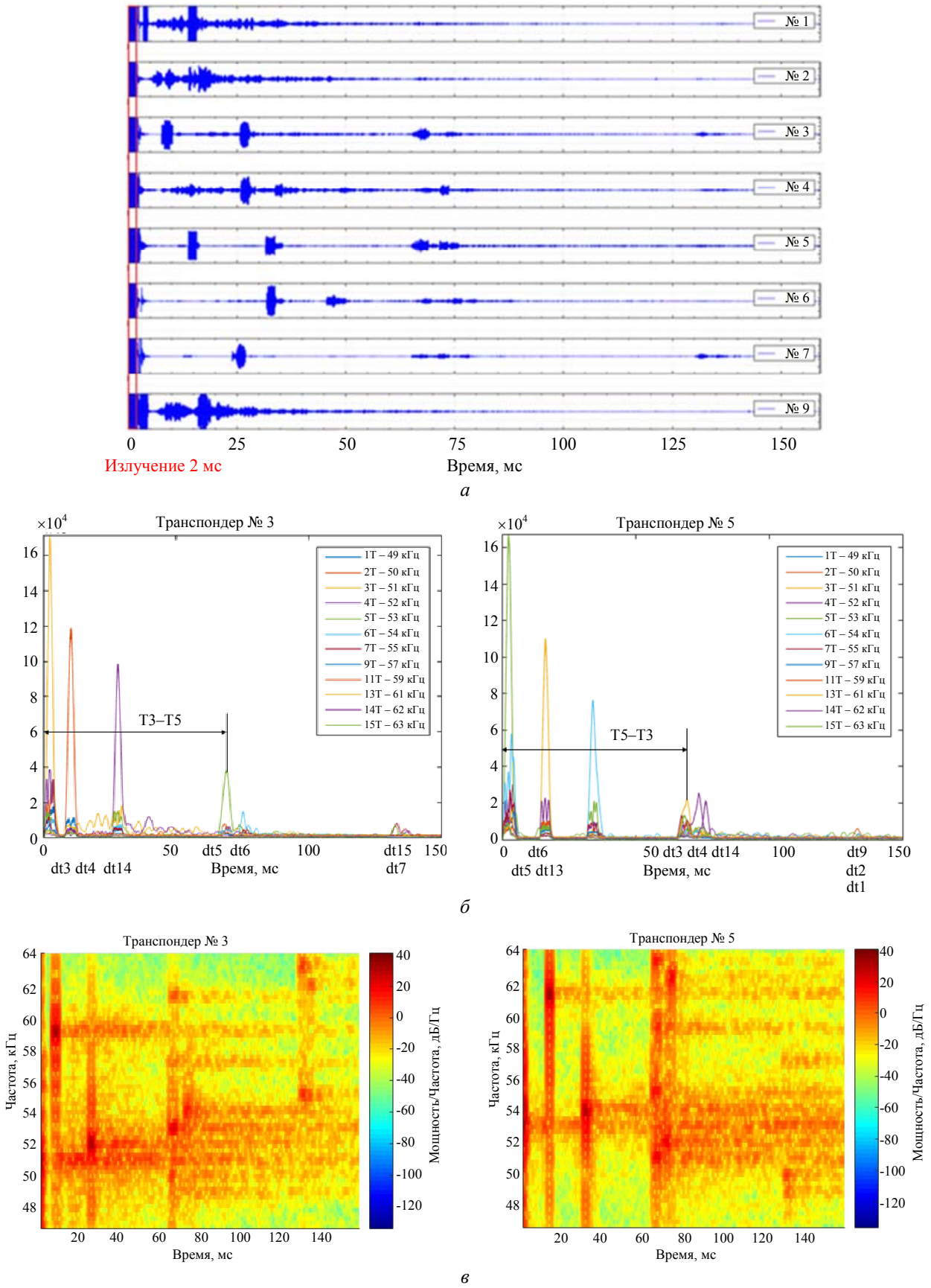


Рис. 3. Акустические эксперименты в море и их результаты: а – временные выборки излученных (2 мс) и принятых сигналов 8 транспондерами в ходе эксперимента из использованных 12 транспондеров на трех сейсмокосах на Черном море; б – взаимные корреляционные функции принятого сигнала с исходным излученным импульсом на каждой частоте для транспондеров № 3 и № 5 (выделена временная задержка между 3 и 5 транспондером); в – спектрограммы принятых сигналов для транспондеров № 3 и № 5.

На рис. 4 представлен результат позиционирования системы по измеренным акустическим дистанциям относительно буксируемых маяков GPS. Расчет производился с помощью бортового программного обеспечения (ПО) по разработанным алгоритмам. Произведено сравнение нашего алгоритма расчета с измерениями позиций транспондеров с помощью GPS-маяка, закрепленного на моторной лодке и работающего в режиме ручного измерения.

На рис. 4 видно, что определение позиции только одного транспондера (№ 11) оказалось ошибочным. Ошибка позиционирования была вызвана неисправностями антенны устройства, из-за чего уровень излучаемого им сигнала оказался ниже порога детекторов, а уровень внутренних шумов не позволяет ему произвести детектирование сигналов других устройств. Используемый алгоритм позволил идентифицировать этот транспондер как неисправный элемент и вычислить его позицию как среднее арифметическое между элементов с известными координатами. Ошибка позиционирования корректно работающих устройств системы составляет менее 1 м и является удовлетворительной для задач морской сейсморазведки.

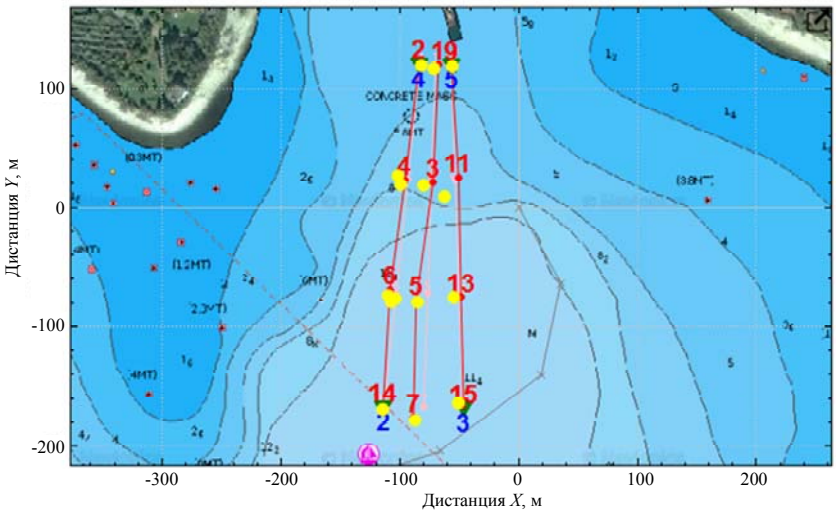


Рис. 4. Сравнение позиционирования системы из 12 транспондеров на 3 сейсмокосах с координатами, измеренные буксируемым маяком GPS. Верхний индекс – индекс транспондера. Нижний индекс – индекс буксируемого маяка GPS. Отдельные точки – измеренные геокоординаты транспондеров.

Заключение

Разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять позиционирование систем буксируемых сейсмокос для задач морской сейсморазведки, использующие адаптированные для задач гидроакустики методы корреляционного анализа, порогового детектирования и спектрального Фурье-анализа со скользящим окном.

Испытания алгоритмов для тестовой системы в акустическом бассейне показали возможность их отладки только для ограниченной системы, включающих не более 5–6 прототипов устройств акустических транспондеров на расстоянии до 10 метров друг от друга на глубине 4 м. При масштабировании такой системы (увеличение число транспондеров в системе) происходит пересечение приемных частотных диапазонов. Таким образом, при детектировании сигнала с большой амплитудой в соседних частотных каналах наблюдается уровень корреляции в соотношении 1/5, что может привести к невозможности детектирования в таком канале сигнала меньшей амплитуды, пришедшего с дальней дистанции. Для масштабирования такой системы достаточно устанавливать транспондеры на расстояниях >50 м друг от друга и избегать одновременного приема сигналов на соседних частотных диапазонах на один транспондер. В ходе экспериментов распределение частотных диапазонов осуществлялось разработанным бортовым ПО. Аналогом может стать излучение и обработка более сложных сигналов, состоящих из уникального набора частот для каждого устройства, что, в свою очередь, приведет к наращиванию вычислительной мощности устройств.

Натурные испытания системы с использованием разработанных алгоритмов были проведены в серии экспериментов по измере-

нию излучения, дистанций и позиционирования на Черном море. Они показали возможность проведения измерений с бóльшим числом акустических устройств (до 12) в открытом море по сравнению с акустическим бассейном. Были оценены спектрограммы принятых сигналов для транспондеров с выраженными спектральными полосами, превышающие уровень шума до 30 раз в моменты прихода сигналов. Ошибка позиционирования, проведенная по разработанным алгоритмам, для работающих устройств системы составляет менее 1 м и является удовлетворительной для задач морской сейсморазведки.

Можно предположить, что разработанное ПО будет достаточным для позиционирования в открытом море до 8 сейсмокос, содержащих до 16 элементов каждая, и это позволит быстро производить обработку зондирующих сигналов минимальными вычислительными средствами, находящимися на борту транспондера.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ампилов Ю. П.* // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 5. doi:10.18303/1813-4254-2015-4-5-14

2. *Musser James A., Ridyard Dave, Dr. Erik Hupkens*, Streamer Positioning for Advanced 3D and 4D Applications – GEOHORIZONS. 2006.

3. *Ампилов Ю. П.* // OFFSHORE-Russia. 2014. № 4 (6). С. 8–15.

4. *Смирнов В. А. Черноусов А. Д.* Программа расчета характеристик направленности акустических антенных решеток. Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов – АО Концерн «Моринсис-Агат», 4–5 апреля 2017, Москва.

5. *VanTrees Harry L.* Optimum Array Processing, Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. – Wiley-interscince, 2002.

6. *Смарышев М. Д.* Направленность гидроакустических антенн. – Изд. "Судостроение", Ленинград, 1973.

7. *Баронкин В. М., Гладилин А. В.* Анализ эффективности функционирования антенны в пассивном режиме при слабых сигналах / Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. – М., ГЕОС, 2008.

8. *Максимов Г. А., Денисов Д. Н., Ларичев В. А., Лесонен Д. Н. и др.* // Ученые записки физического факультета московского университета. 2017. № 5. С. 1750126.

9. *Карабанов И. В., Миронов А. С.* Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. – Изд-во ТОГУ Хабаровск, 2018.

10. *Скворцова Н. Н., Шестаков О. В., Малахов Д. В.* Лекции по курсу «Прикладная радиофизика». Методы численного анализа стохастических сигналов. Учебное пособие. – Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), 2011.

PACS: 43.30.Xm 43.30.Vh, 43.30.Wi

Data processing algorithms of radiophysical signals for remote monitoring systems in hydrosphere

V. A. Smirnov[1,2,3], N. N. Skvortsova[1,2,4], G. A. Maksimov[3,4], V. A. Larichev[3], D. A. Smagin[3], and V. M. Lekomcev[3]

[1] Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

[2] MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

[3] Andreev Acoustic Institute
4 Shvernika st., Moscow, 117036, Russia

[4] National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russia
E-mail: Viperx15@mail.ru

Received October 3, 2019

The application of correlation and spectral analysis algorithms for radiophysical signals with the aim of accurate positioning of remote monitoring systems in the hydrosphere is considered. Initial testing of the developed algorithms for measuring acoustic distances were carried out in an acoustic pool. Remote monitoring devices were tested in the Black Sea both in stationary conditions from the pier and when moving by a towing vessel. The positioning result of the system obtained using the developed algorithms by the measured acoustic distances is presented and the positioning error is estimated. It is shown that the measurement of acoustic distances using the developed algorithms meets the requirements for positioning marine 3D seismic systems.

Keywords: hydroacoustics, monitoring, marine seismic exploration, positioning, correlation analysis, spectral analysis.

REFERENCES

1. U. P. Ampilov, Seismic technology, No. 4, 5 (2015).
2. James A. Musser, Dave Ridyard, Dr. Erik Hupkens, *Streamer Positioning for Advanced 3D and 4D Applications* (GEOHORIZONS, 2006).
3. U. P. Ampilov, OFFSHORE-Russia, No. 4 (6), 8 (2014).
4. V. A. Smirnov and A. D. Chernousov, *Program for directivity characteristics calculations of acoustic antenna arrays. The state, problems and prospects of creating ship information and control complexes* (Morinsis-Agat, April 4–5, 2017, Moscow).
5. Harry L. VanTrees, *Optimum Array Processing, Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory* (Wiley-interscince, 2002).
6. M. D. Smaryshev, *The orientation of hydroacoustic antennas*. (Sudostroenie, Leningrad, 1973).
7. V. M. Baronkin and A. V. Gladilin, *Analysis of the performance of the antenna in the passive mode with weak signals.* In *Proceedings of the XX session of the Russian Acoustic Society*. (Moscow. Geos. 2008).
8. G. A. Maksimov, D. N. Denisov, V. A. Larichev, D. N. Lesonen, et al., Naucn. Zapiski Physich. Facult. Moscow Univers., No. 5, 1750126 (2017).
9. I. V. Karabanov and A. S. Mironov, *Algorithms for processing of hydroacoustic signals* (Izd. TOGU, Khabarovsk, 2018).
10. N. N. Skvortsova, O. V. Shestakov, and D. V. Malakhov, *Lectures on the course "Applied Radio Physics". Methods of numerical analysis of stochastic signals: Textbook* (Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation – Technical University, 2011).