АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2025, том 71, № 3, с. 383–391

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.222

О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ

В. В. Безответных[a], А. А. Голов[a,*], А. А. Тагильцев[a], Ю. Н. Моргунов[a]

[a]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: golov_alexander@inbox.ru

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.
После доработки 24.03.2025 г.
Принята к публикации 06.05.2025 г.

Статья посвящена определению оптимальных параметров зондирующих сигналов гидроакустической системы мониторинга температурных режимов морских акваторий тысячекилометровых масштабов. Представлены результаты моделирования помехоустойчивости сложных сигналов различной длительности и разрешающей способности. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний на акустической трассе протяженностью 1073 км в Японском море. Показано влияние импульсной характеристики волновода на помехоустойчивость сигналов с различной разрешающей способностью. Определены предпочтительные последовательности зондирующих сигналов.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, импульсная характеристика, корреляционная обработка

DOI: 10.31857/S0320791925030062, **EDN:** JTWMML

ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения, происходящие в глобальных масштабах, на сегодняшний день являются темой множества публикаций [1–5]. Подавляющее большинство специалистов по климату связывают эти процессы с глобальным потеплением. Мировой океан является основным аккумулятором тепла планетарного масштаба, малейшие изменения средних температур которого могут влиять на глобальные перестройки циркуляций как водных, так и воздушных масс. Эти изменения, в свою очередь, могут приводить к возникновению неблагоприятных погодных явлений, таких как ураганы и аномально высокие температуры. Большую обеспокоенность вызывает также скорость этих изменений. В связи с этим, чрезвычайно важно проводить мониторинг флуктуаций температурных режимов океана как в глобальных, так и в региональных масштабах, что может быть осуществлено на недоступных для спутниковых наблюдений глубинах только методами акустической томографии.

Акустическая томография широко применяется в общемировой практике мониторинга гидрофизических параметров акваторий [6–10]. Активный метод томографии основан на разнесенном по пространству и синхронизированному по времени излучении и приеме импульсных зондирующих акустических сигналов [11]. При корреляционной обработке принятого сигнала определяется импульсная характеристика (ИХ) волновода. При таком подходе ИХ отображает сумму вкладов отдельных лучей, прошедших по уникальным траекториям, и вычисляется как взаимная корреляционная функция (ВКФ) зарегистрированного сигнала с копией излученного:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, y(t-\tau)\, dt,$$

где $x(t)$ — исходный сигнал, $y(t)$ — зарегистрированный сигнал, τ — смещение.

Из структуры ИХ выделяются отдельные приходы акустической энергии, соответствующие вкладам отдельных лучей, и измеряется время их пробега от источника. По известной дистанции между излучателем и приемником рассчитываются скорости звука для всех компонент ИХ. Полученные значения скоростей пересчитываются с помощью эмпирической формулы Чена–Миллеро (ЮНЕСКО) в температуры, соответствующие определенному водному слою [12].

В качестве зондирующих широко применяются фазоманипулированные сигналы, модулированные псевдослучайными бинарными M-последовательностями в виду их выдающихся свойств. В частности,

– M-последовательности являются периодическими последовательностями с количеством символов $N = 2^n - 1$, где n — степень порождающего полинома из поля Галуа GF(2) [13];

– количество символов, принимающих значение единица, на длине одного периода M-последовательности на единицу больше, чем количество символов, принимающих значение нуль;

– сумма по модулю 2 любой M-последовательности с ее произвольным циклическим сдвигом также является M-последовательностью;

– значение автокорреляционной функции M-последовательности равно N;

– уровень боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ) приблизительно равен $1/\sqrt{N}$.

Для формирования сложного сигнала символы M-последовательности могут быть модулированы скачками фазы (фазовая модуляция) или частоты (частотная модуляция). Фазовая бинарная модуляция предпочтительна с точки зрения возможности корреляционной обработки без демодуляции принятого сигнала до символов формирующей последовательности (классическая корреляция), что существенно упрощает алгоритм обработки. К тому же, такой подход считается самым помехоустойчивым [14]. Задание оптимальных параметров сигналов является одним из важнейших факторов, определяющих результирующие характеристики томографической системы, такие как помехоустойчивость, разрешающая способность и масштабы диагностируемых акваторий.

В работе исследуются сигналы с центральной частотой 400 Гц, выбор которых обусловлен приемлемым затуханием на дистанциях порядка тысячи километров и возможностью использования в экспериментальных исследованиях акустического излучателя с приведенным уровнем звукового давления 8–12 кПа/м в этой области частот.

1. ПАРАМЕТРЫ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

Важнейшим параметром зондирующих сигналов является длительность элементарного символа формирующей M-последовательности. Эта величина влияет на устойчивость сигнала к межсимвольной интерференции при многолучевом распространении, определяет занимаемую сигналом полосу частот и разрешающую способность по времени. Разрешающая способность корреляционного метода определения времени приходов акустической энергии равна длительности символа последовательности. Чем меньше длительность символа, тем более подробную информацию о канале из полученной ИХ можно извлечь. С другой стороны, чем меньше длительность символа, тем больше влияние межсимвольной интерференции, которая является фактором снижения помехоустойчивости. В радиосвязи принято определение “умеренная межсимвольная интерференция”, при которой возможно восстановление всех символов передаваемой последовательности, и которая определяется как $\tau \leq 2T$, где τ — время затягивания или ширина ИХ, а T — длительность символа, при условии непрерывного следования символов в последовательности [15]. При соблюдении данного соотношения, информацию о структуре ИХ получить невозможно, так как результатом операции свертки всегда будет только один пик. Исходя из вышесказанного, длительность элементарного символа задающей M-последовательности должна быть короче на порядок и более, чем ширина ИХ волновода. При этом неизбежно снижается помехоустойчивость и как следствие — сокращаются масштабы зондируемых акваторий. Еще одним фактором, ограничивающим снижение длительности символа, является полоса рабочих частот применяемого гидроакустического излучателя. Для большинства специально разработанных конструкций излучателей эта величина не превышает 25% от несущей [16, 17]. Для бинарных фазоманипулированных сигналов ширина спектра рассчитывается как удвоенная обратная величина от длительности символа $\Delta f = 2/T$ — ширина спектра по первым нулям, имеющего огибающую вида $(\sin x/x)^2$ [14]. С другой стороны, многофакторность реальных условий распространения звука на акустической трассе, оказывающих влияние на ИХ волновода, не позволяет аналитически решить задачу выбора необходимой структуры сигнала и требует экспериментальной проверки в натурных условиях.

Количество псевдослучайных символов в модулирующей M-последовательности задает помехоустойчивость сигнала при корреляционном детектировании. Помехоустойчивость можно оценить как отношение (K) основного пика ВКФ принятого сигнала с репликой излученного к уровню ВКФ с сигналом, модулированным ортогональной (квазиортогональной) M-последовательностью:

$$K = \frac{\max\left(R_{xy}(\tau)\right)}{\max\left(R_{xz}(\tau)\right)},$$

где

$$R_{xz}(\tau) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} x(t)\, z(t-\tau)\, dt,$$

а $z(t)$ — сигнал той же частоты и длительности, но модулированный иной M-последовательностью, дающей минимальное значение ВКФ с сигналом $x(t)$.

Приблизительно его можно оценить как $K \approx \sqrt{n} / 2$, где n — количество символов задающей M-последовательности. Данную величину можно рассматривать как показатель ортогональности последовательностей для случая отсутствия влияния помех и как показатель помехоустойчивости при условии наличия аддитивной помехи.

Для задания динамического порога обнаружения зондирующего сигнала используется дополнительный корреляционный канал, в котором в качестве маски используется квазиортогональная M-последовательность той же длины. Необходимо отметить, что отношение K может варьироваться в достаточно широких пределах в зависимости от конкретно выбранных пар последовательностей, и определяется на этапе предварительного моделирования.

Таким образом, при решении практических задач акустической термометрии для определения оптимальной длительности символа и длины M-последовательности зондирующих сигналов, необходимо проводить не только предварительное моделирование, но и натурные испытания подготовленной библиотеки сигналов для выбранных на акватории акустических трасс.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При организации томографической схемы с одним источником сигнала достаточно подобрать пару последовательностей необходимой длины с максимальным возможным показателем K. Одна последовательность используется в качестве зондирующего сигнала, другая для задания динамического порога обнаружения на стороне приема.

В данной работе было решено подобрать по 4 последовательности длиной 127, 1023 и 2047 символов. Это даст возможность организации схем различных масштабов, состоящих из трех излучающих элементов, что существенно увеличит качество проводимых измерений. Для схем с несколькими источниками, каждый излучатель должен иметь свою уникальную последовательность для обеспечения возможности его идентификации. При этом в качестве ортогональной будет достаточно одной, ортогональной каждой из трех.

Руководствуясь критериями приемлемого затухания на дистанциях порядка тысячи километров и возможностью использования в экспериментальных исследованиях акустического излучателя с высоким уровнем звукового давления в этой области частот, в качестве набора тестируемых сигналов были выбраны псевдослучайные фазоманипулированные M-последовательности с центральной частотой 400 Гц со следующими обозначениями и параметрами (табл. 1).

Таблица 1. Параметры сигналов.

Обозначение	Длина, количество символов	Количество периодов несущей частоты на символ
*M*127_8	127	8
*M*127_20		20
*M*127_40		40
*M*127_100		100
*M*1023_4	1023	4
*M*1023_8		8
*M*1023_20		20
*M*1023_40;		40
*M*1023_100		100
*M*2047_8;	2047	8
*M*2047_20;		20
*M*2047_40		40
*M*2047_100		100

Показатель K рассчитывался как отношение максимального значения АКФ к максимальному значению ВКФ для каждой пары сигналов. Так для M-последовательностей длительностью 127 символов показатель K варьируется от 2.95 до 7.05, для 1023 символа эта величина находится в пределах 2.6–13.8, а для 2047 — от 6.6 до 22.2. Как видно, разброс величин K весьма велик, поэтому для достижения максимальной помехоустойчивости, *на первом этапе*, необходимо рассчитать все возможные комбинации из существующих.

Выбор оптимального набора сигналов, состоящего из N сигналов, состоит из двух шагов: определение N бинарных M-последовательностей, ВКФ которых дают максимальное значение K, и преобразование этих последовательностей в фазоманипулированные сигналы.

Для этого из m числа примитивных полиномов поля Галуа GF(2) (таблицы полиномов приведены в [18, 19]) для получения псевдослучайных последовательностей максимальной длины формируется m бинарных M-последовательностей:

$$MO = \begin{bmatrix} mp_{11} & mp_{12} & \ldots & mp_{1n} \\ mp_{21} & mp_{22} & \ldots & mp_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ mp_{m1} & mp_{m2} & \ldots & mp_{mn} \end{bmatrix},$$

где n — количество символов M-последовательности, mp_{ij} — j-ый символ i-ой M-последовательности.

M-последовательности преобразуются к виду [−1, 1] как:

$$MI = \begin{bmatrix} -1^{mp_{11}} & -1^{mp_{12}} & \ldots & -1^{mp_{1n}} \\ -1^{mp_{21}} & -1^{mp_{22}} & \ldots & -1^{mp_{2n}} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ -1^{mp_{m1}} & -1^{mp_{m2}} & \ldots & -1^{mp_{mn}} \end{bmatrix}; \ MP = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \ldots \\ M_m \end{bmatrix},$$

где M_i — i-я последовательность в бинарном виде [−1, 1], длиной n.

Методом сочетания без повторения формируется $l = \dfrac{m!}{j!(m-j)!}$ возможных комбинаций набора из N последовательностей;

$$L = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_N \\ M_1 & M_2 & \dots & M_{N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{m-j+1} & M_{m-j+2} & \dots & M_m \end{bmatrix}.$$

Причем, количество строк в матрице L равно l.

Методом сочетания без повторения для каждой строки матрицы L формируется матрица возможных корреляционных пар в наборе, количество пар определяется как:

$$cp = \frac{N!}{2!(N-2)!}.$$

Рассчитывается ВКФ для каждой пары, и формируется матрица максимумов ВКФ пар последовательностей. Размер матрицы $l \times cp$:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1cp} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2cp} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{l1} & r_{l1} & \dots & r_{lcp} \end{bmatrix}.$$

Вычисляется максимальное значение в каждой строке R. Выбирается строка из матрицы R с наименьшим значением максимума из всех. Номер выбранной строки соответствует номеру строки матрицы L, содержащей комбинацию сигналов, которая дает между собой наибольшее значение коэффициента K с наименьшим разбросом.

На практике для формирования M-последовательности применяются устройства, основу которых составляет регистр сдвига, охваченный линейной обратной связью с сумматором по модулю 2 (один или несколько логических элементов “исключающее ИЛИ”). Структуру обратных связей генерирующих регистров сдвига и их емкость как раз и определяют примитивные полиномы. В результате выбора были определены предпочтительные четверки последовательностей, образованные указанными ниже полиномами (слева представлены в полиномиальном виде, справа — запись коэффициентов в двоичной форме). Детально методика генерации M-последовательностей рассмотрена в [18, 19].

Последовательности 127 символов (количество элементов памяти в регистре сдвига — 7, показатель $K \approx 6$):

$x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$ 1011100;
$x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$ 1110010;
$x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + 1$ 1111000;
$x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ 1111110.

Последовательности 1023 символов (количество элементов памяти в регистре сдвига — 10, показатель $K \approx 13$):

$x^{10} + x^3 + 1$ 1000000100;
$x^{10} + x^9 + x^4 + x + 1$ 1100001001;
$x^{10} + x^9 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$ 1101101111;
$x^{10} + x^9 + x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$ 1110011100.

Последовательности 2047 символов (количество элементов памяти в регистре сдвига — 11, показатель $K \approx 20$):

$x^{11} + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$ 10001100111;
$x^{11} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ 10110111110;
$x^{11} + x^{10} + x^7 + x^2 + 1$ 11001000010;
$x^{11} + x^{10} + x^9 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1$ 11101011101.

Степень полинома равна количеству элементов памяти в регистре сдвига. “1” в двоичной форме записи означает, что выход данного элемента памяти регистра сдвига подключен к сумматору по модулю 2, “0” — не подключен. Генерируемую последовательность можно снимать как с выхода сумматора, так и с любого элемента памяти. При этом во всех случаях полученная последовательность будет иметь один и тот же вид, отличия будут лишь в циклическом сдвиге. Направление сдвига — справа налево. Смена направления сдвига приведет к формированию зеркальной последовательности с аналогичными корреляционными свойствами. Начальное состояние элементов памяти задавалось как все “1”.

На рис. 1 приведен пример рассчитанных АКФ и ВКФ для пары сигналов длительностью 127 символов, при отсутствии зашумления и показателем $K = 6.41$, что говорит о квазиортогональности M-последовательностей.

На втором этапе, для количественной оценки помехоустойчивости в зависимости от длительности элементарных символов задающих

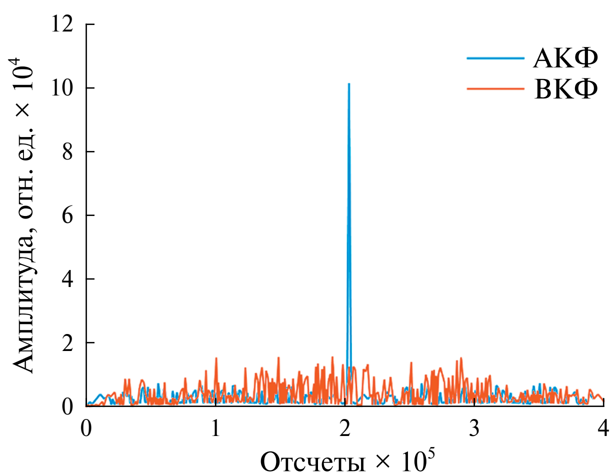

Рис. 1. Пример расчета АКФ и ВКФ для 127-символьной последовательности.

последовательностей из выбранного набора производились следующие расчеты:

1. Производилось добавление к тестируемому сигналу и его ортогональной составляющей белого Гауссова шума определенного уровня;

2. Рассчитывалась АКФ зашумленного тестируемого сигнала и определялся уровень ее максимума;

3. Рассчитывалась ВКФ зашумленного тестируемого сигнала и его зашумленной ортогональной составляющей, определялся уровень максимума ВКФ;

4. Рассчитывалось отношение максимумов АКФ к максимумам ВКФ, что и является показателем *K*.

Оценка помехоустойчивости производилась в полосе 300–500 Гц, соответствующей сигналу с минимальной длительностью символа при отношениях сигнал/шум от −30 до 30 дБ. Ниже представлены результаты расчетов помехоустойчивости к белому Гауссовому шуму для выбранного набора сигналов (рис. 2).

Отношение сигнал шум задавалось программно с помощью функции awgn в платформе MatLab. Наиболее близкая формула выглядит следующим образом

$$\mathrm{SNR} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{\text{signal}}-P_{\text{noise}}}{P_{\text{noise}}}\right),$$

$$P_{\text{signal}} = \int_{f1}^{f2}\left|X(f)^2\right|\mathrm{d}f,$$

$$P_{\text{noise}} = \int_{f1}^{f2}\left|Y(f)^2\right|\mathrm{d}f,$$

где $X(f)$ и $Y(f)$ — преобразование Фурье фрагментов записей, содержащих сигнал и окружающий шум в полосе частот f_1 и f_2 соответственно.

Как видно из рисунка, с увеличением длительности сигнала и снижением ширины частотной полосы его помехоустойчивость возрастает.

3. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ БИБЛИОТЕКИ СИГНАЛОВ

Натурные испытания проводились в августе 2022 г. Излучатель находился на шельфе в 5 км от свала глубин вблизи поселка Чехов острова Сахалин. Уровень звукового давления составлял 198 дБ относительно 1 мкПа на расстоянии в 1 метр от излучателя. Дрейфующая приемная система на базе радиогидроакустического буя, сопровождаемая малошумным судном, располагалась вблизи б. Кита-Ямато в Японском море. Координаты дрейфа ежесекундно фиксировались системой GPS и учитывались при расчетах расстояния между излучателем и приемной системой. Протяженность акустической трассы составляла 1073 км и в процессе дрейфа изменялась незначительно (в пределах 300 м). В качестве зондирующих использовался тот же набор сигналов, что и при моделировании.

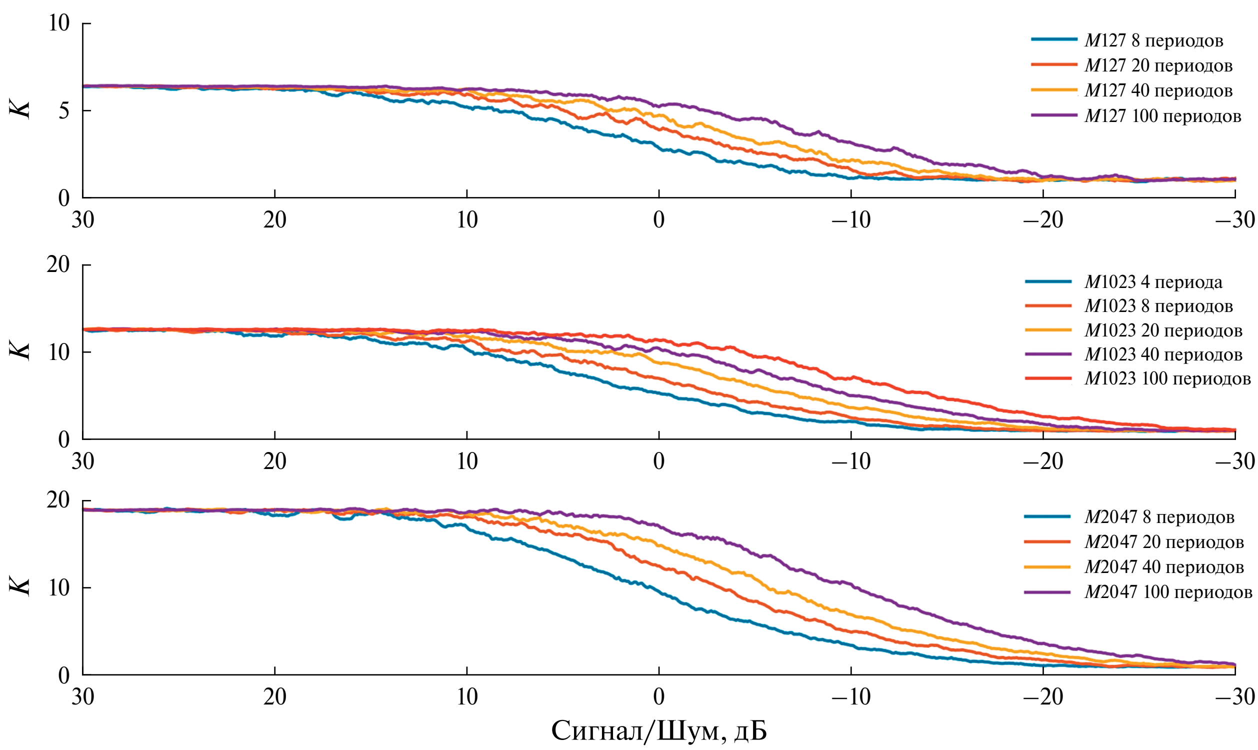

Рис. 2. Оценка помехоустойчивости к белому Гауссовому шуму выбранного набора сигналов.

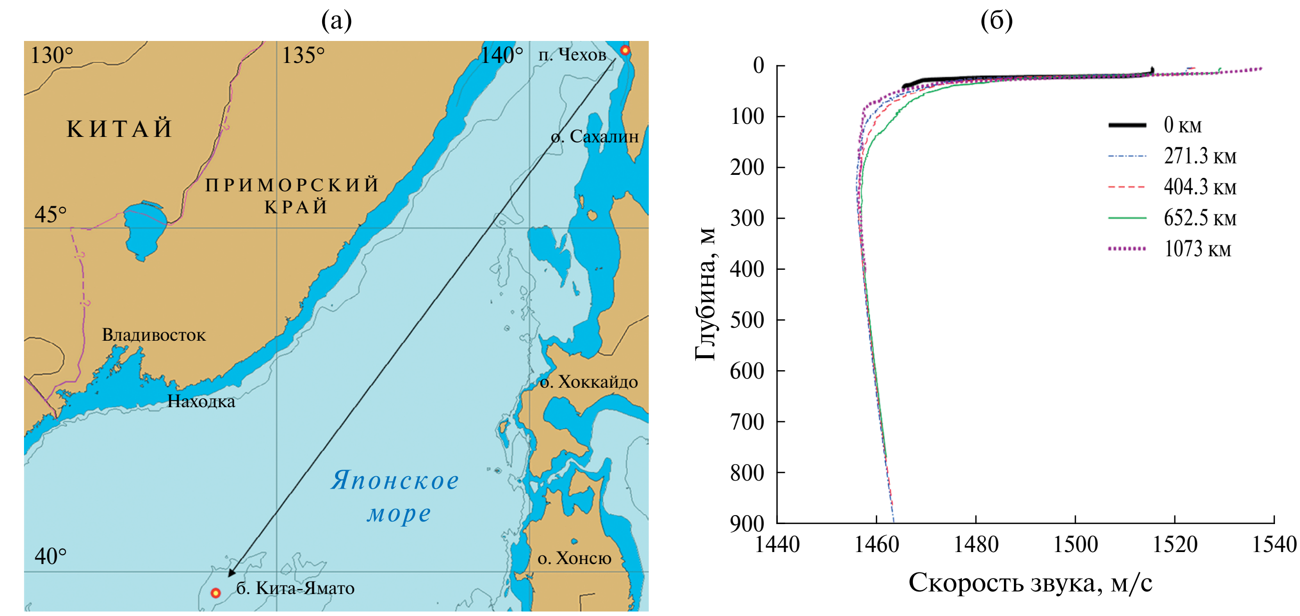

Рис. 3. (а) — Схема натурных испытаний и (б) — вертикальное распределение скорости звука по глубине на различных дистанциях от излучателя.

Продолжительность сеанса излучение/прием составила 10 ч.

На рис. 3а приведена схема натурных испытаний. Вблизи приемной системы и в точках на удалениях 271.3, 404.3 и 652.5 км от излучателя производилось измерение вертикального распределения скорости звука (рис. 3б).

Характер вертикальных распределений скоростей звука во всех точках глубокого моря говорит о наличии подводного звукового канала в диапазоне глубин 150–300 м. Гидрофон РГБ погружался до глубины 250 м с целью регистрации сигналов, прошедших трассу вблизи оси ПЗК с наименьшим затуханием [20].

Отношение сигнал/шум в точке приема не превышало 0 дБ. Данное утверждение говорит о том, что отношение среднеквадратичных амплитуд в рабочей полосе частот на участках записи в моменты наличия сигнала и его отсутствия не превышало единицы, т.е. сигнал не может быть выделен во временной области. В результате корреляционной обработки принятых сигналов, ИХ волновода имели ширину по времени 0.5 с. На рис. 4 приведен пример влияния разрешающей способности сигнала на информативность ИХ.

Из рисунка видно, что длительность символов сигналов M127_100 соответствует соотношению “умеренная межсимвольная интерференция” и, как следствие, не несет информацию об отдельных приходах акустической энергии. Применение таких сигналов для мониторинга гидрофизических параметров морской среды нецелесообразно. Длительность символов M127_40 приблизительно в 5 раз короче ИХ, что дает возможность, в отдельных случаях, выделить от 3 до 5 отдельных приходов. Более подробную информацию о приходах дает M1023_4, но ввиду большего влияния межсимвольной интерференции помехоустойчивость этого сигнала заметно снижается (малое превышение основных пиков над корреляционным шумом, см. табл. 2).

По оценкам результатов сопоставления длительностей сигналов, амплитуд импульсных характеристик, а также соотношений основных пиков к корреляционному шуму можно заключить, что сигналы длительностью более 200 с не дают ожидаемого корреляционного выигрыша на стороне приема (M1023_100, M2047_40, M2047_100). Это говорит о том, что время когерентности канала менее 200 с. Таким образом, условия распространения акустической энергии заметно меняются в течение длительности зондирующего сигнала, что приводит к неидентичному искажению формы сигнала на различных его участках. Под ожидаемым корреляционным выигрышем подразумевается увеличение отношения основного пика к корреляционному шуму с увеличением длительности последовательности, пропорционально квадратному корню от коэффициента увеличения количества символов в последовательности. К примеру, при увеличении длительности M-последовательности с 1023 символов до 2047, отношение основного пика к корреляционному шуму должно увеличиться в $\sqrt{\frac{2047}{1023}} = 1.4$ раза (3 дБ). В итоге, можно утверждать, что применение сигналов, не подпадающих под этот критерий, нецелесообразно, ввиду их чрезмерной длительности и заведомо более низкой помехоустойчивости. Время

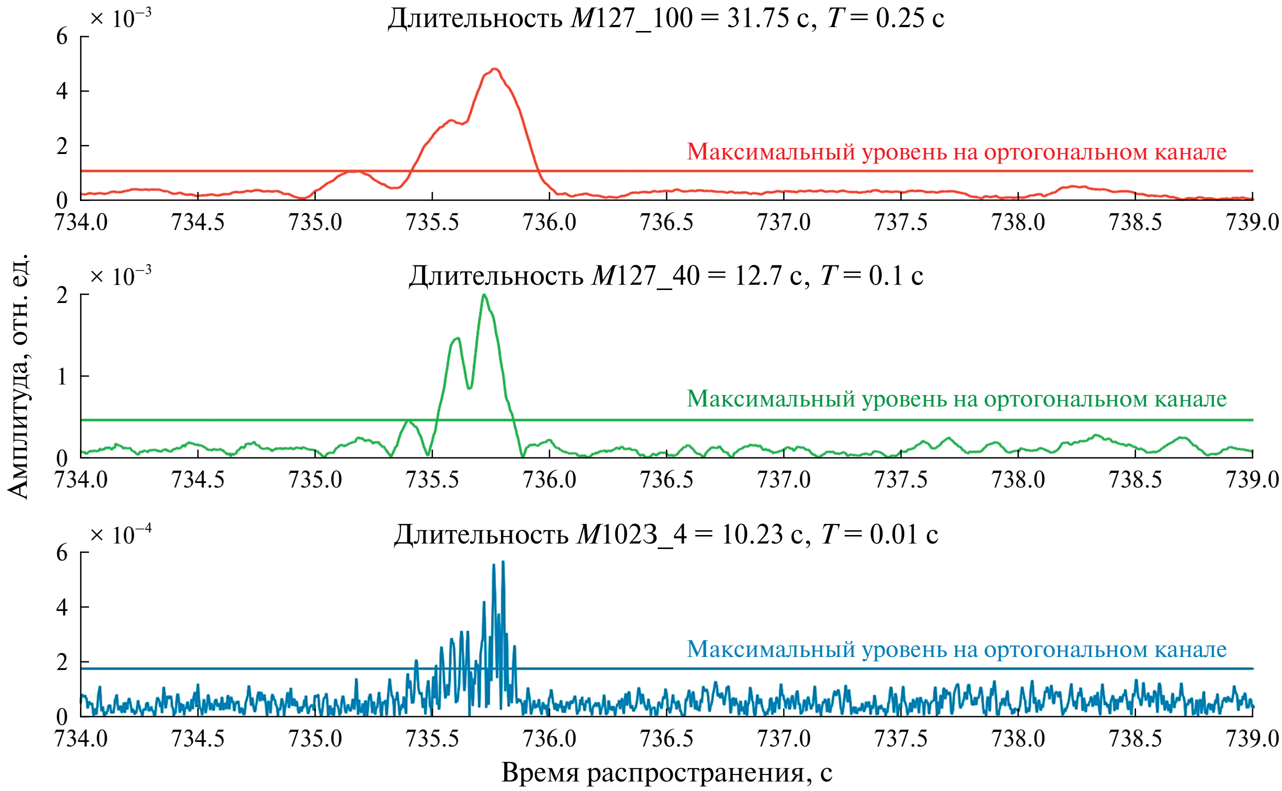

Рис. 4. Зависимость разрешающей способности сигнала от длительности символа.

Таблица 2. Параметры зондирующих сигналов с центральной частотой 400 Гц.

сигналы	T, с	$T\times N$, с	Δf, Гц	$K_{теор}$	$K_{эксп}$	Вывод
M127_8	**0.02**	**2.54**	**100**	*2.83*	*2.12*	*низкая помехоустойчивость*
M127_20	**0.05**	**6.35**	**40**	**3.88**	*2.67*	*низкая помехоустойчивость*
M127_40	*0.1*	**12.7**	**20**	**4.74**	**4.56**	*низкая разрешающая способность*
M127_100	*0.25*	**31.75**	**8**	**5.2**	**5.11**	*низкая разрешающая способность*
M1023_4	**0.01**	**10.23**	*200*	**5.34**	*2.36*	*низкая помехоустойчивость/ широкая полоса частот*
M1023_8	**0.02**	**20.46**	**100**	**7.01**	**4.47**	**приемлемые параметры**
M1023_20	**0.05**	**51.15**	**40**	**8.79**	**7.73**	**приемлемые параметры/ высокая помехоустойчивость**
M1023_40	*0.1*	**102.3**	**20**	**10.45**	**10.29**	*низкая разрешающая способность/* **высокая помехоустойчивость**
M1023_100	*0.25*	*255.75*	**8**	**11.38**	**3.92**	*низкая разрешающая способность/ чрезмерная длительность*
M2047_8	**0.02**	**40.94**	**100**	**9.63**	**5.37**	**приемлемые параметры**
M2047_20	**0.05**	**102.35**	**40**	**12.58**	**11.33**	**приемлемые параметры/ высокая помехоустойчивость**
M2047_40	*0.1*	*204.7*	**20**	**14.9**	**4.55**	*низкая разрешающая способность/ чрезмерная длительность*
M2047_100	*0.25*	*511.75*	**8**	**17.14**	*3.89*	*низкая разрешающая способность/ чрезмерная длительность*

когерентности канала определяется не только динамическими процессами волновода, но и использованием квазистационарной трассы распространения (сигналы регистрируются дрейфующей приемной системой) вместо стационарной, как при реализации классической схемы акустической томографии [21]. Тем не менее, применение подобной схемы организации зондирования морской среды

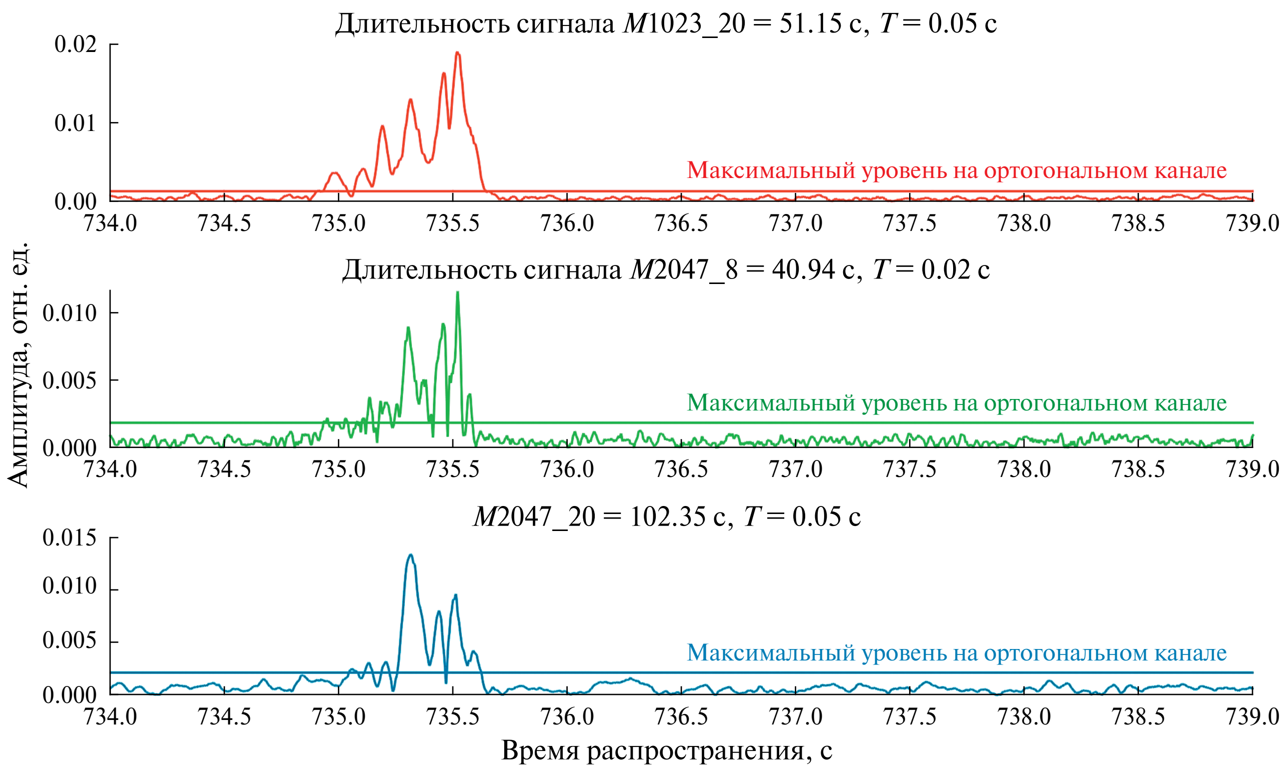

Рис. 5. Пример импульсных характеристик волновода для сигналов 1023 и 2047-символьных *M*-последовательностей.

вполне оправдано, так как существенно упрощает реализацию томографической схемы и позволяет увеличить разнообразие геометрий акустических трасс.

Примеры импульсных характеристик волновода для сигналов 1023 и 2047-символьных *M*-последовательностей с длительностью менее 200 с приведены на рис. 5.

Подводя итог, из всей библиотеки испытанных сигналов для трассы протяженностью 1073 км, ширины ИХ порядка 0.5 с и соотношения сигнал/шум порядка 0 дБ, можно выделить четыре сигнала, наиболее подходящих для мониторинга гидрофизических параметров морской среды, — это *M*1023_20, *M*2047_8, *M*1023_8 и *M*2047_20. В сводной табл. 2 приведен перечень всех сигналов с характеристиками. Курсивом выделены сигналы с не оптимальными параметрами по помехоустойчивости и разрешающей способности. Жирным шрифтом — приемлемые параметры. Показатель помехоустойчивости K в таблице рассчитывался как среднее значение по всем реализациям для соответствующих сигналов, зарегистрированных в точке приема. Основываясь на опыте предыдущих работ по акустической дальнометрии [22, 23], для уверенного детектирования сигнала без ложных срабатываний значение K должно быть не менее 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные испытания, проведенные в Японском море, показали, что для задач акустической томографии на трассах протяженностью порядка тысячи километров и ширины ИХ порядка 0.5 с, наиболее подходящими зондирующими сигналами являются *M*1023_20, *M*2047_8, *M*1023_8 и *M*2047_20. Использование квазистационарной трассы распространения и динамические процессы, происходящие в волноводе, приводят к ограничению длительности зондирующих сигналов — не более 200 с. Максимальную помехоустойчивость показали сигналы с длительностями порядка 100 с. Для отслеживания отдельных приходов акустической энергии из структуры ИХ волновода, разрешающая способность сигналов с центральной частотой 400 Гц должна быть не хуже 0.02–0.05 с. Полоса частот излучаемого сигнала не должна превышать 25% несущей ($\Delta f \leq 100$ Гц для центральной частоты 400 Гц).

Анализ расчетных зависимостей и натурных результатов показывает, что увеличение разрешающей способности сигналов приводит к уменьшению помехоустойчивости вследствие межсимвольной интерференции, при этом увеличение длины последовательности до значений, не превышающих времени когерентности канала, может скомпенсировать этот негативный эффект.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН “Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред”, науч. рук. Моргунов Ю.Н. Регистрационный номер: 124022100075-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Short F.T., Neckles H.A.* The effects of global climate change on seagrasses // Aquatic Botany. 1999. V. 63. № 3–4. P. 169–196.
2. *Karl T.R., Trenberth K.E.* Modern global climate change // Science. 2003. V. 302. № 5651. P. 1719–1723.
3. *Bodansky D.* The history of the global climate change regime // International relations and global climate change. 2001. V. 23. № 23. P. 505.
4. *Arrow K.J.* Global climate change: A challenge to policy // The Economists' Voice. 2007. V. 4. № 3.
5. *Снакин В.В.* Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность // Жизнь Земли. 2019. Т. 41. № 2. С. 148–164.
6. *Jochum M., Murtugudde R.* Physical Oceanography Springer Science+Business Media, Inc. 2006. P. 1–254.
7. The ATOC Consortium. Ocean Climate Change: Comparison of Acoustic Tomography, Satellite Altimetry, and Modeling / The ATOC Consortium // Science. 1998. V. 281. P. 1327–1332.
8. *Dushaw B.D., Worcester P.F., Munk W.H., Spindel R.C., Mercer J.A., Howe B.M., Metzger Jr. K., Birdsall T.G., Andrew R.K., Dzieciuch M.A., Cornuelle B.D., Menemenlis D.* A decade of acoustic thermometry in the North Pacific Ocean // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C07021. https://doi.org/10.1029/2008JC005124
9. *Jesus S.M., Soares C., Onofre J., Picco P.* An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. № 3. P. 420–1431.
10. *Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н.* К локальной акустической томографии на морском шельфе // Доклады XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета по акустике РАН. М., 2010. С. 225–229.
11. *Munk W.U., Vorchester P., Wunsh C.* Ocean acoustic tomography. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995. 423 pp.
12. *Chen C.-T., Millero F.J.* Speed of sound in seawater at high pressures // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62. № 5. P. 1129–1135.
13. *Лидл Р., Нидеррайтер Г.* Конечные поля. В 2 т. М.: Мир, 1988. 430 с
14. *Алексеев А.И., Шереметьев А.Г., Тузов Г.И., Глазов Б.И.* Теория и применение псевдослучайных сигналов. М.: Наука, 1969. 368 с.
15. *Латхи Б.П., Дин Чжи.* Современные цифровые и аналоговые системы связи. Издательство Оксфордского университета, Inc, 2009. ISBN 9780195331455.
16. *Бритенков А.К., Фарфель В.А., Боголюбов Б.Н.* Сравнительный анализ электроакустических характеристик компактных низкочастотных гидроакустических излучателей высокой удельной мощности // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72–77.
17. *Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А.* Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // Труды МАИ. 2019. Вып. № 105. С. 1-24.
18. *Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.Л., Зайцев Д.Л., Зеликман Л.И., Пестряков А.В., Сенявский А.Л., Смирнов Н.И., Судовцев В.А.* Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. Под ред. Пестрякова В.Б. М.: Сов. радио, 1973. 424 с.
19. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
20. *Dolgikh G., Morgunov Y., Golov A., Bezotvetnykh V., Voytenko E., Lebedev M., Razzhivin V., Kaplunenko D., Tagiltsev A., Shkramada S.* Pilot Acoustic Tomography Experiment in the Sea of Japan at 1073 km Distance // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. 1325. https://doi.org/10.3390/jmse11071325
21. *Кулаков А.В., Попов Р.Ю.* Определение интервалов временной стабильности параметров гидроакустического канала // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 671–678.
22. *Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Голов А.А., Буренин А. В., Лебедев М.С., Петров П.С.* Экспериментальное исследование импульсной характеристики волновода Японского моря с использованием псевдослучайных последовательностей в приложении к навигации удаленных объектов // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 3. С. 291–297.
23. *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. № 1. С. 20–33.

On the criteria for selecting parameters of sounding signals for a hydroacoustic system for temperature monitoring of water areas of the Sea of Japan

V. V. Bezotvetnykh[a], A. A. Golov[a,*], A. A. Tagiltsev[a], Yu. N. Morgunov[a]

[a]*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Baltiiskaya st. 43, Vladivostok, 690041 Russia*

**e-mail: golov_alexander@inbox.ru*

The article is devoted to determining the optimal parameters of sounding signals of a hydroacoustic system for monitoring temperature regimes of sea water areas on a thousand-kilometer scale. The results of modeling the noise immunity of complex signals of various durations and resolutions are presented. The results of modeling and full-scale tests on an acoustic path with a length of 1073 km in the Sea of Japan are presented. The influence of the waveguide impulse response on the noise immunity of signals with different resolutions is shown. Preferred sequences of sounding signals have been determined.

Keywords: hydroacoustics, pseudorandom signals, impulse response, correlation processing