

АКУСТИКА ОКЕАНА.

ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.222

О критериях выбора параметров зондирующих сигналов для гидроакустической системы температурного мониторинга акваторий Японского моря

Безответных В.В., Голов А.А., Тагильцев А.А., Моргунов Ю.Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43
Тел.: (423-2)311-613; Факс: (423-2)312-600
E-mail: golov_alexander@inbox.ru*

Статья посвящена определению оптимальных параметров зондирующих сигналов гидроакустической системы мониторинга температурных режимов морских акваторий тысячекilометровых 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

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. Также большую обеспокоенность вызывает скорость этих изменений. В связи с чем, 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]. Активный метод томографии основан на разнесенном по пространству и синхронизированном по времени излучении и

приеме импульсных зондирующих акустических сигналов [7]. При корреляционной обработке принятого сигнала определяется импульсная характеристика (ИХ) волновода. Из структуры ИХ выделяются отдельные приходы акустической энергии и измеряется время их пробега от источника. По известной дистанции между излучателем и приемником рассчитываются скорости звука для всех компонент ИХ. Средняя температура в волноводе рассчитывается посредством применения общепринятого в океанологии алгоритма Чена-Миллера [8].

В качестве зондирующих сигналов широко применяются псевдослучайные M-последовательности в виду их выдающихся корреляционных свойств. Модуляция может быть как частотной, так и фазовой. 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 [9]. 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 большее 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 [10]. 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 М-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 % [11-12]. 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 $(\sin x/x)^2$ [9]. 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 натуральных условиях.

Количество псевдослучайных символов в модулирующей М-последовательности задает помехоустойчивость сигнала при корреляционном детектировании. Помехоустойчивость можно оценить как отношение основного пика ИХ зондирующего сигнала к корреляционному шуму в ортогональном корреляционном канале — K . Приблизительно его можно оценить как $K \approx \sqrt{n}/2$, где n – количество символов задающей М-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 М-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 М-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 произвести подбор 4 последовательностей 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 (Таблица 1).

Таблица 1. Параметры сигналов

Обозначение	Длина, символов	Количество периодов несущей частоты на символ
M127_8	127	8
M127_20		20
M127_40		40
M127_100		100
M1023_4	1023	4
M1023_8		8
M1023_20		20
M1023_40;		40
M1023_100		100
M2047_8;	2047	8

M2047_20;		20
M2047_40		40
M2047_100		100

Показатель K рассчитывался как отношение максимального значения автокорреляционной функции (АКФ) к максимальному значению взаимно-корреляционной функции (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 фазоманипулируемые сигналы.

Для этого из m числа полиномов Галуа для получения псевдослучайных последовательностей максимальной длины формируется m бинарных M -последовательностей [13]:

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

Где:

n - количество символов M -последовательности;

mp_{ij} - j -ый символ i -ой M -последовательности.

M -последовательности преобразуется к виду $[-1, 1]$ как:

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

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

Методом сочетания без повторения формируется $l = \frac{m!}{j!(m-j)!}$ 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 на 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 даёт между собой наибольшее значение коэффициента K с наименьшим разбросом.

В результате выбора были определены предпочтительные четверки последовательностей со следующими примитивными полиномами, определяющими структуру обратных связей генерирующего регистра сдвига [13].

Последовательности 127 символов (степень полинома $n = 7$, показатель $K \approx 6$):

$$x^7+x^5+x^4+x^3+1;$$

$$x^7+x^6+x^5+x^2+1;$$

$$x^7+x^6+x^5+x^4+1;$$

$$x^7+x^6+x^5+x^4+x^3+x^2+1.$$

Последовательности 1023 символа (степень полинома $n = 10$, показатель $K \approx 13$):

$$x^{10}+x^3+1;$$

$$x^{10}+x^9+x^4+x+1;$$

$$x^{10}+x^9+x^7+x^6+x^4+x^3+x^2+x+1;$$

$$x^{10}+x^9+x^8+x^5+x^4+x^3+1.$$

Последовательности 2047 символов (степень полинома $n = 11$, показатель $K \approx 20$):

$$x^{11}+x^7+x^6+x^3+x^2+x+1;$$

$$x^{11}+x^9+x^8+x^6+x^5+x^4+x^3+x^2+1;$$

$$x^{11}+x^{10}+x^7+x^2+1;$$

$$x^{11}+x^{10}+x^9+x^7+x^5+x^4+x^3+x+1.$$

На рисунке 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 М-последовательностей.

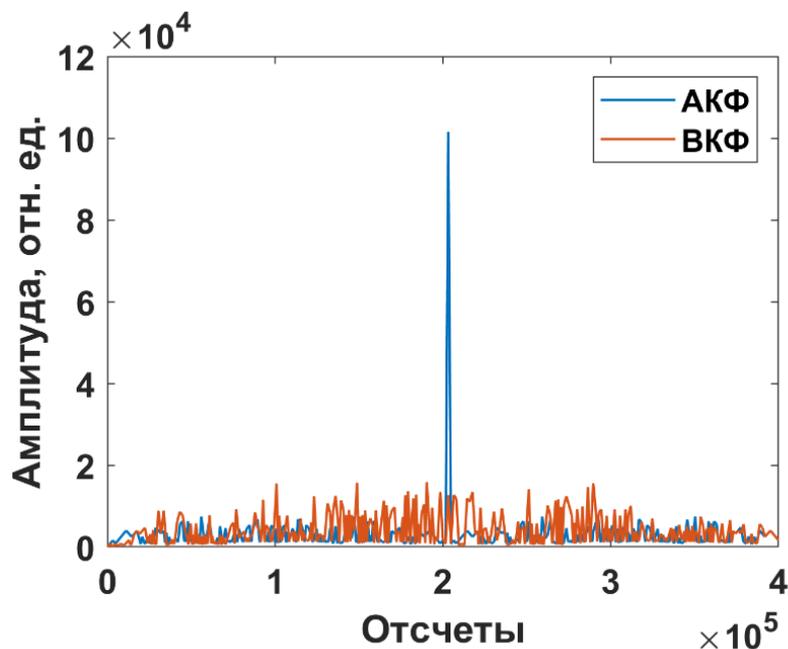


Рисунок 1 – Пример расчета АКФ и ВКФ для 127- символьной последовательности

На втором этапе, для количественной оценки помехоустойчивости в зависимости от длительности элементарных символов задающих 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 дБ до 30 дБ. Ниже представлены результаты расчетов помехоустойчивости к белому Гауссовому шуму для выбранного набора сигналов (рисунок 2).

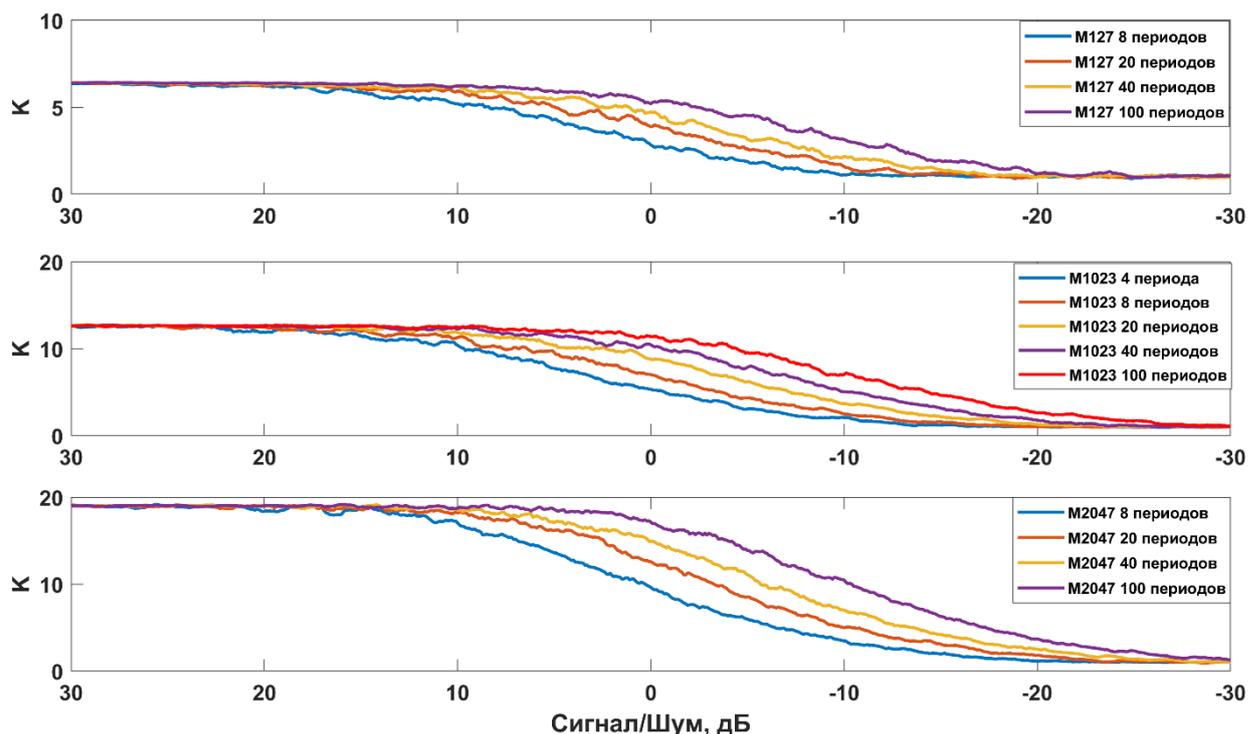


Рисунок 2 – Оценка помехоустойчивости к белому Гауссовому шуму выбранного набора сигналов

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 года. 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 бую, сопровождаемая малозумным судном, располагалась вблизи б. Кита-Ямато в Японском море. Координаты

дрейфа ежедневно 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. Продолжительность сеанса излучение/прием составила 10 часов.

На рисунке 3а приведена схема натуральных 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 (рисунок 3б).

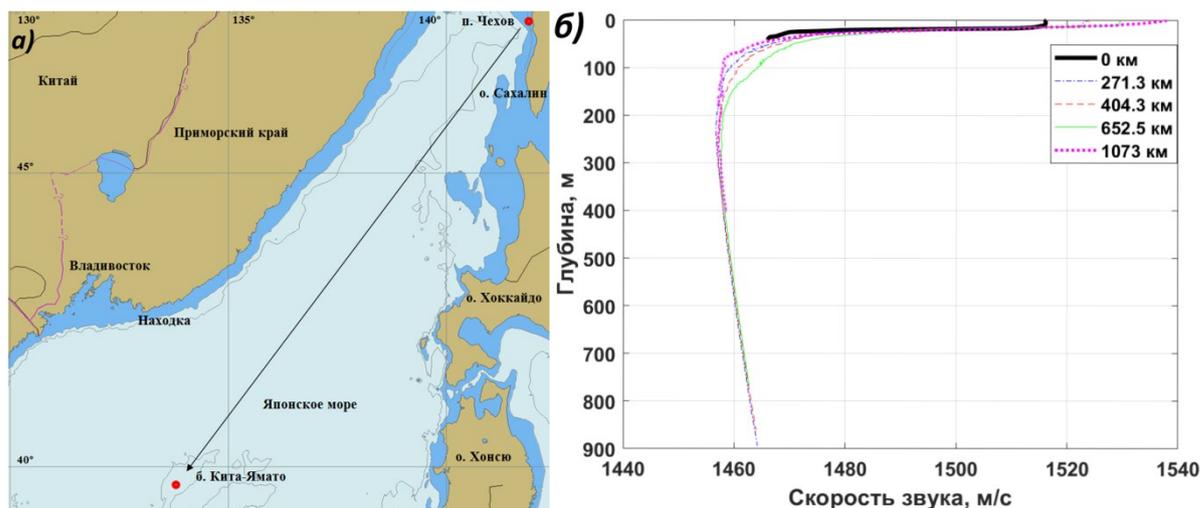


Рисунок 3 – Схема натуральных испытаний (а) и вертикальное распределение скорости звука по глубине на различных дистанциях от излучателя (б)

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 [14].

Отношение сигнал/шум в точке приема не превышало 0 дБ. В результате корреляционной обработки принятых сигналов, ИХ волновода имели ширину по времени 0.5 секунды. На рисунке 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. таблицу 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 секунд не дают ожидаемого корреляционного выигрыша на стороне приема (M1023_100, M2047_40, M2047_100). Это говорит о том, что время когерентности канала менее 200 секунд. То есть, 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 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 [15]. Тем не менее, применение подобной схемы организации зондирования морской среды вполне оправдано, так как существенно упрощает реализацию томографической схемы и позволяет увеличить разнообразие геометрий акустических трасс.

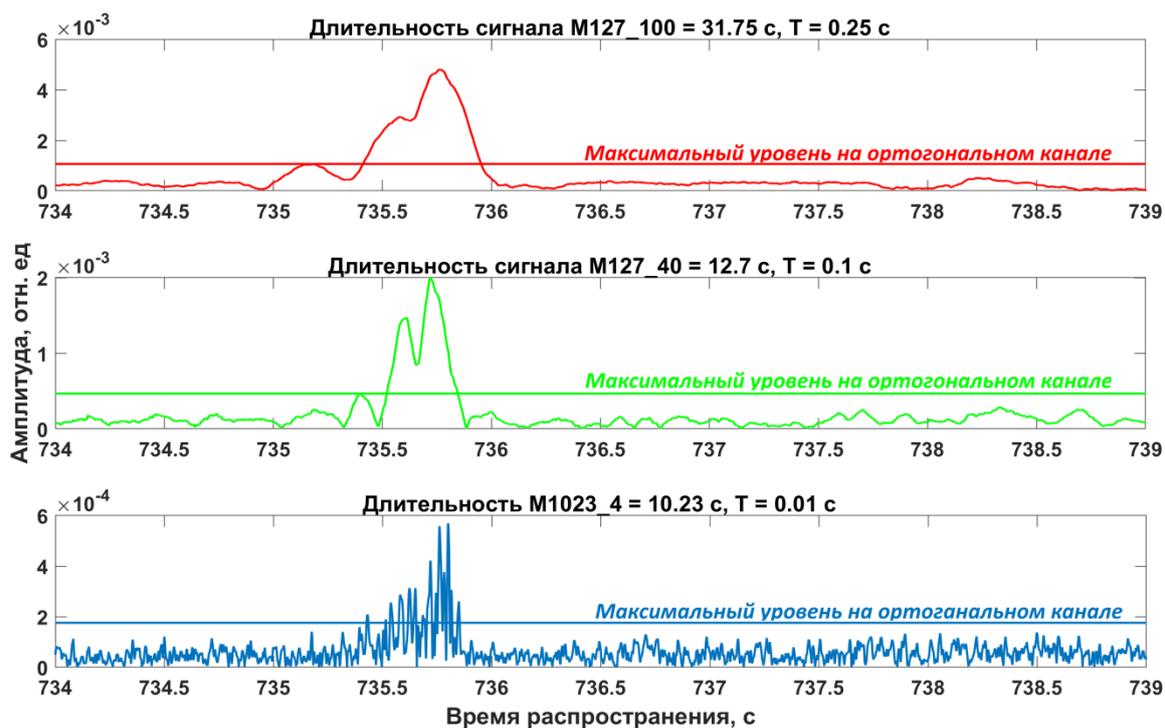


Рисунок 4 – Зависимость разрешающей способности сигнала от длительности символа

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

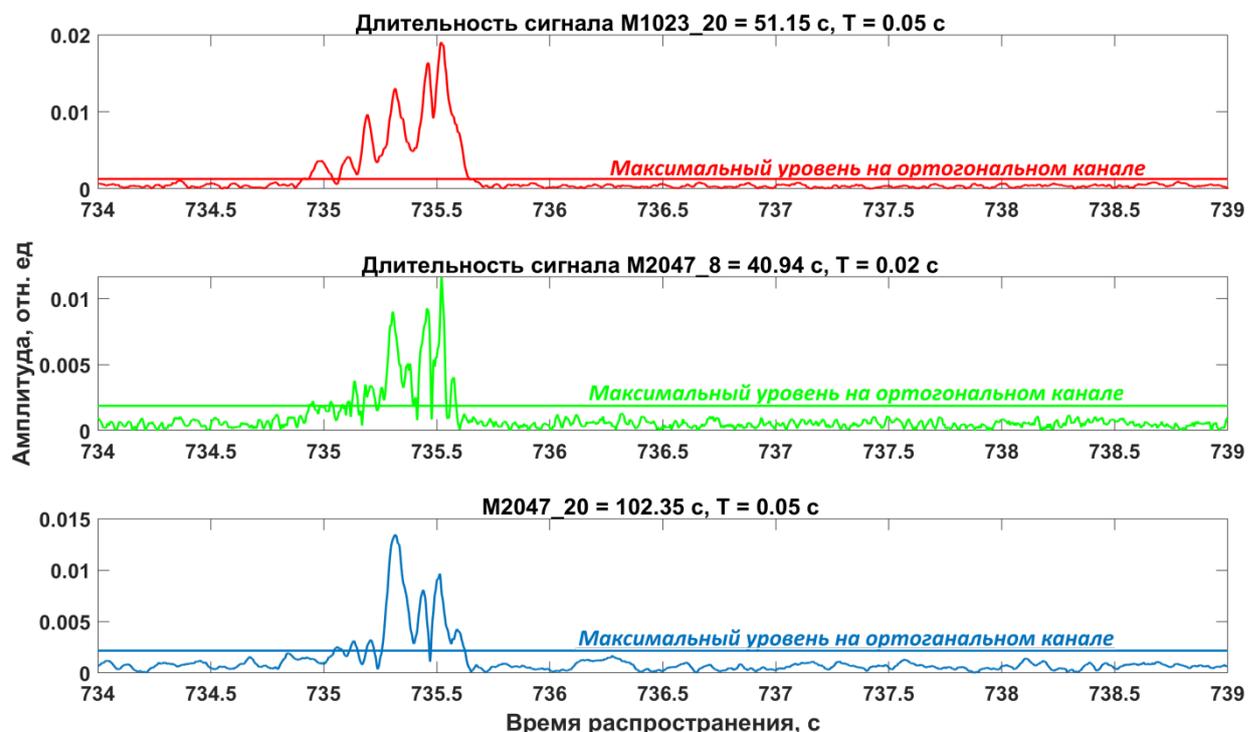


Рисунок 5 – Пример импульсных характеристик волновода для сигналов 1023 и 2047-символьных M-последовательностей

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 M1023_20, M2047_8, M1023_8 и M2047_20. В сводной таблице 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 [16-17], для уверенного детектирования сигнала без ложных срабатываний, значение K должно быть не менее 3.

Таблица 2 – Параметры зондирующих сигналов с центральной частотой 400 Гц

сигналы	T, c	$T \times N, c$	$\Delta f, Гц$	$K_{теор}$	$K_{эсп}$	Вывод
M127_8	0.02	2.54	100	2.83	2.12	<i>низкая помехоустойчивость</i>
M127_20	0.05	6.35	40	3.88	2.67	<i>низкая помехоустойчивость</i>
M127_40	<i>0.1</i>	12.7	20	4.74	4.56	<i>низкая разрешающая способность</i>
M127_100	<i>0.25</i>	31.75	8	5.2	5.11	<i>низкая разрешающая способность</i>
M1023_4	0.01	10.23	<i>200</i>	5.34	2.36	<i>низкая помехоустойчивость /широкая полоса частот</i>
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	<i>0.1</i>	102.3	20	10.45	10.29	<i>низкая разрешающая способность /высокая помехоустойчивость</i>
M1023_100	<i>0.25</i>	<i>255.75</i>	8	11.38	3.92	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>
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	<i>0.1</i>	<i>204.7</i>	20	14.9	4.55	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>
M2047_100	<i>0.25</i>	<i>511.75</i>	8	17.14	3.89	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>

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 секунд, наиболее подходящими зондирующими сигналами являются M1023_20, M2047_8, M1023_8 и M2047_20. Использование квазистационарной трассы распространения и динамические процессы, происходящие в волноводе, приводят к ограничению длительности зондирующих сигналов — не более 200 секунд. Максимальную

помехоустойчивость показали сигналы с длительностями порядка 100 секунд. 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 секунд. Полоса частот излучаемого сигнала не должна превышать 25% несущей ($\Delta f \leq 100$ Гц для центральной частоты 400 Гц).

Анализ расчетных зависимостей и натуральных 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 .

Анализ и интерпретация данных финансированы и выполнены в рамках темы «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования», 2023-2024 гг., No гос. регистрации 123072000039-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Short F. T., Neckles H. A. The effects of global climate change on seagrasses //Aquatic Botany. – 1999. – Т. 63. – №. 3-4. – С. 169-196.
2. Karl T. R., Trenberth K. E. Modern global climate change //science. – 2003. – Т. 302. – №. 5651. – С. 1719-1723.
3. Bodansky D. The history of the global climate change regime //International relations and global climate change. – 2001. – Т. 23. – №. 23. – С. 505.
4. Arrow K. J. Global climate change: A challenge to policy //The Economists' Voice. – 2007. – Т. 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. Munk W.U., Vorchester P., Wunsh C. Ocean acoustic tomography // Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995. 423 pp.

8. Chen C.-T., Millero F.J. Speed of sound in seawater at high pressures // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1977. – Vol. 62, Iss. 5. – P. 1129-1135.
9. А.И. Алексеев, А.Г. Шереметьев, Г.И. Тузов, Б.И. Глазов Теория и применение псевдослучайных сигналов // Москва: Наука, 1969. 368 с.
10. Латхи Б.П., Дин Чжи Современные цифровые и аналоговые системы связи // Издательство Оксфордского университета, Inc. 2009, ISBN 9780195331455.
11. 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.
12. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // Труды МАИ, выпуск № 105, 2019.
13. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. Под ред. Пестрякова В.Б., М., «Сов. радио», 1973, с. 424. Авторы: В.Б. Пестряков, В.П. Афанасьев, В.Л. Гурвиц, Д.Л. Зайцев, Л.И. Зеликман, А.В. Пестряков, А.Л. Сенявский, Н.И. Смирнов, В.А. Судовцев.
14. 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, 11, 1325. <https://doi.org/10.3390/jmse11071325>
15. Кулаков А.В., Попов Р.Ю. Определение интервалов временной стабильности параметров гидроакустического канала // Акустический журнал, 2000, Т. 46, № 5. с. 671-678.
16. 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 // Акустический журнал. 2021. Том 67. № 3. С. 291–297.
17. 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 // Акустический журнал. 2020. Том 66. № 1. С. 20–33.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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

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

Рис. 3. Схема натурных испытаний (а) и вертикальное распределение скорости звука по глубине на различных дистанциях от излучателя (б) Импульсные характеристики, полученные от сигналов с разными длинами символов и количеством символов

Рис. 4. Зависимость разрешающей способности сигнала от длительности символа

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

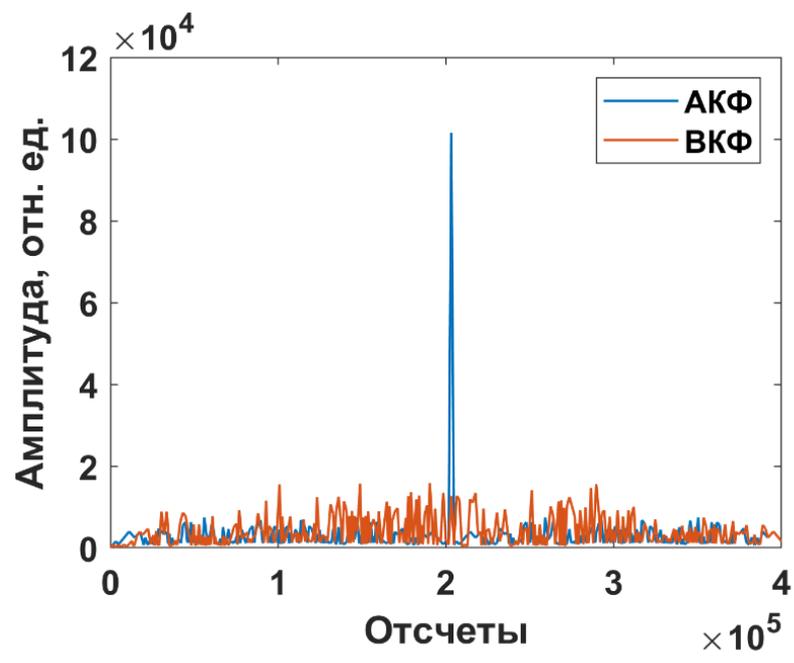


Рис. 1

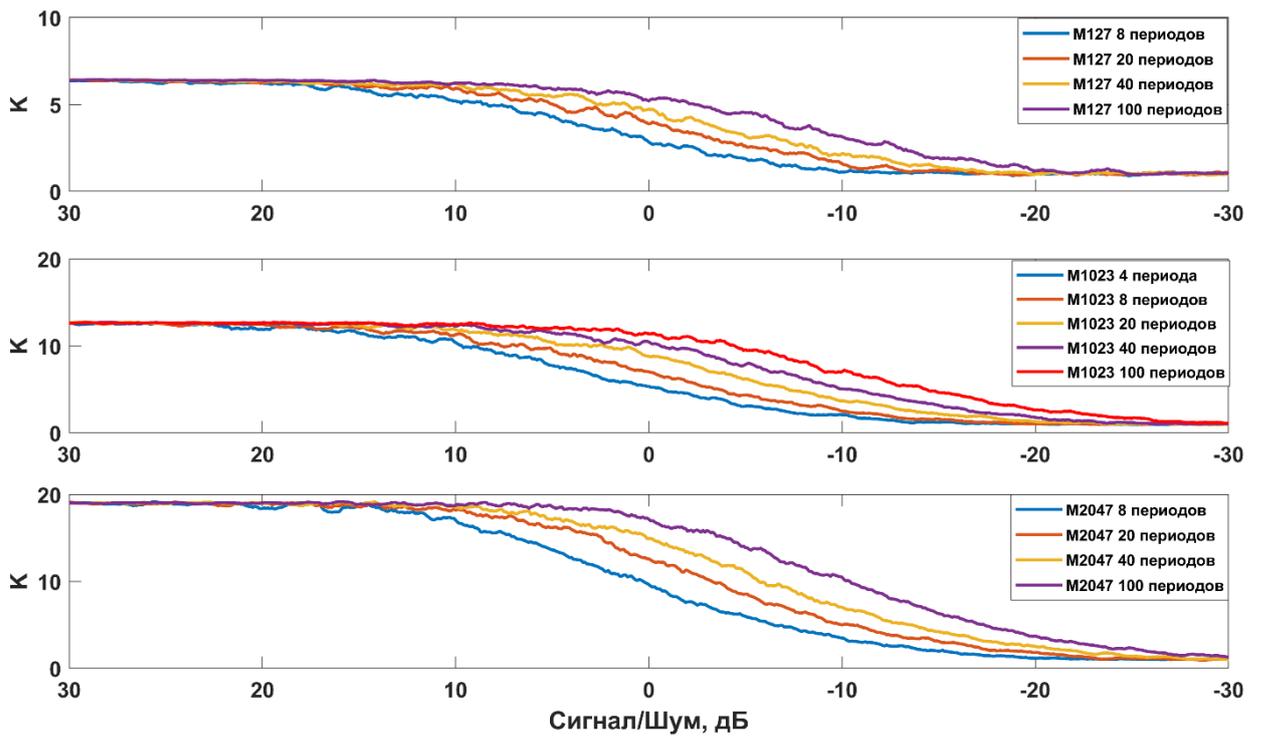


Рис. 2

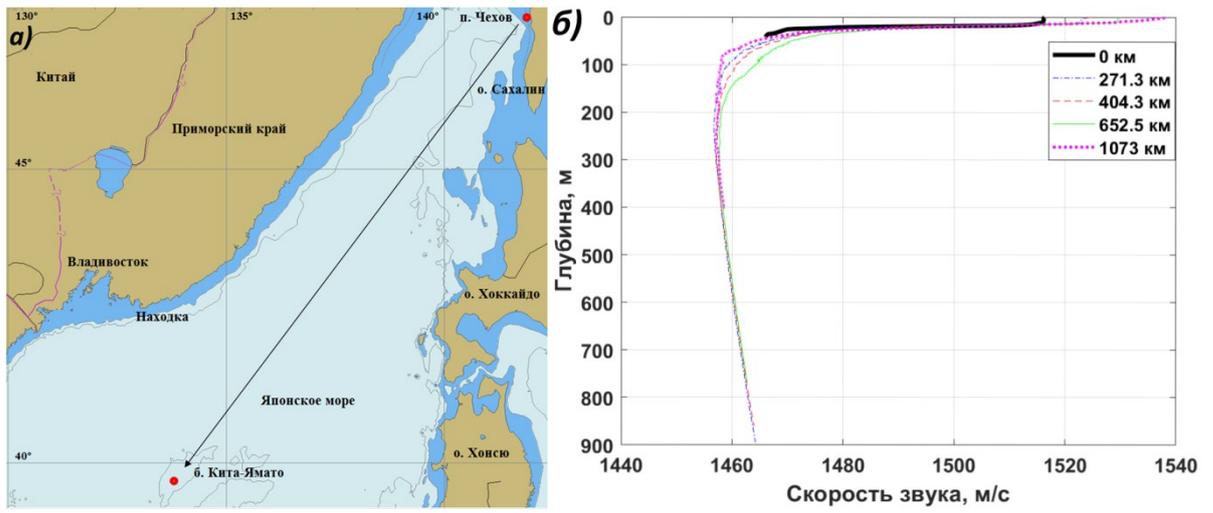


Рис. 3

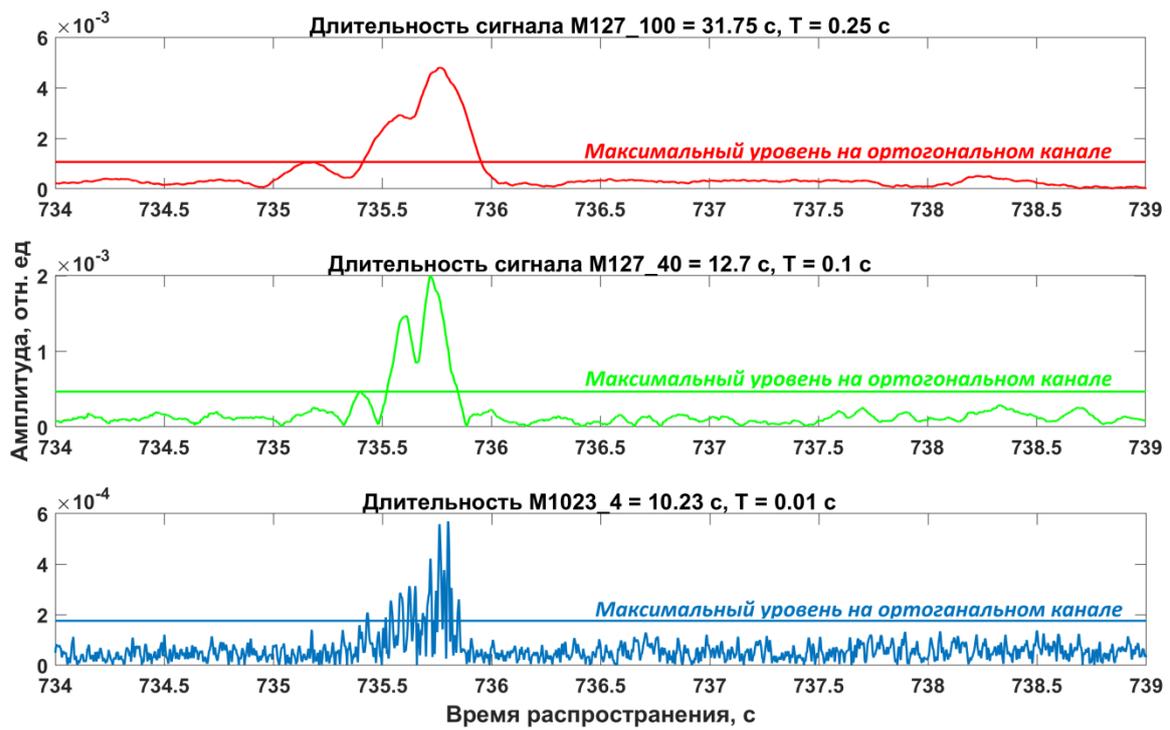


Рис. 4

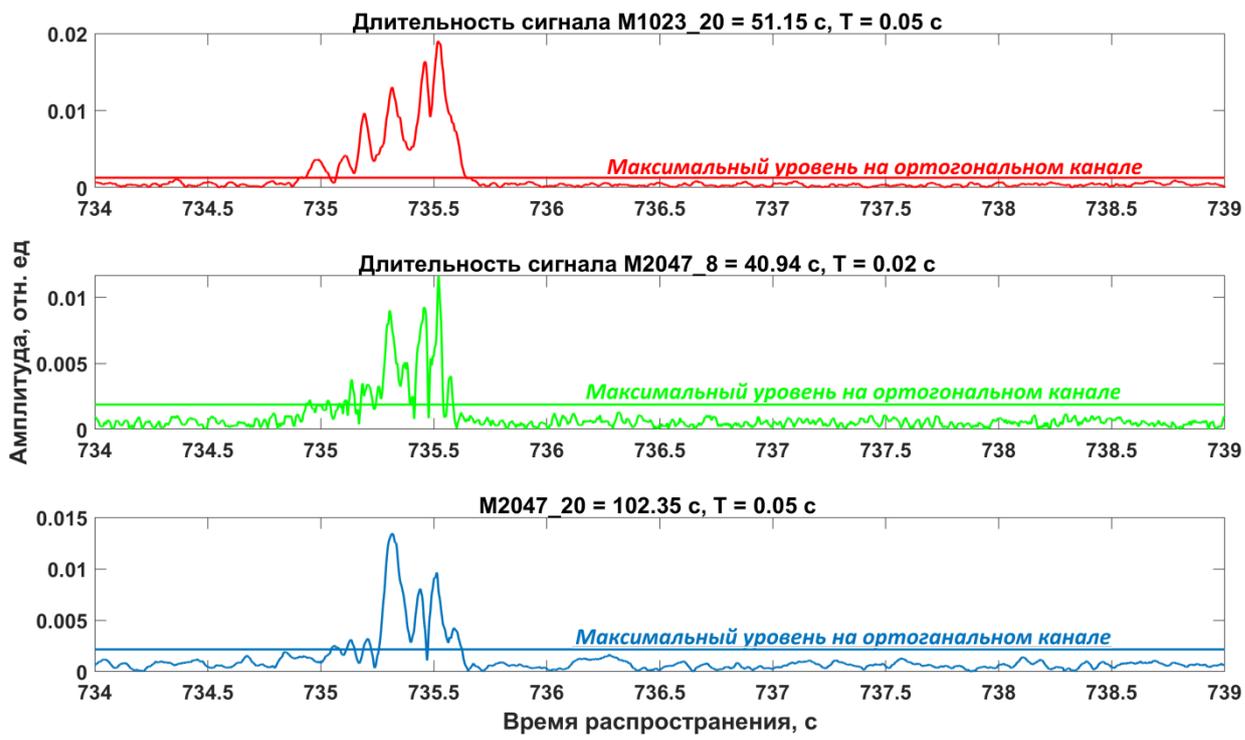


Рис. 5

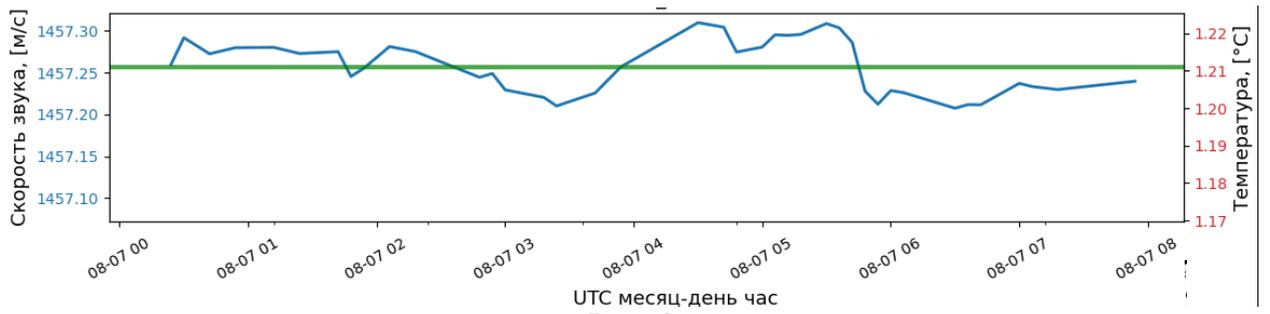


Рис. 6

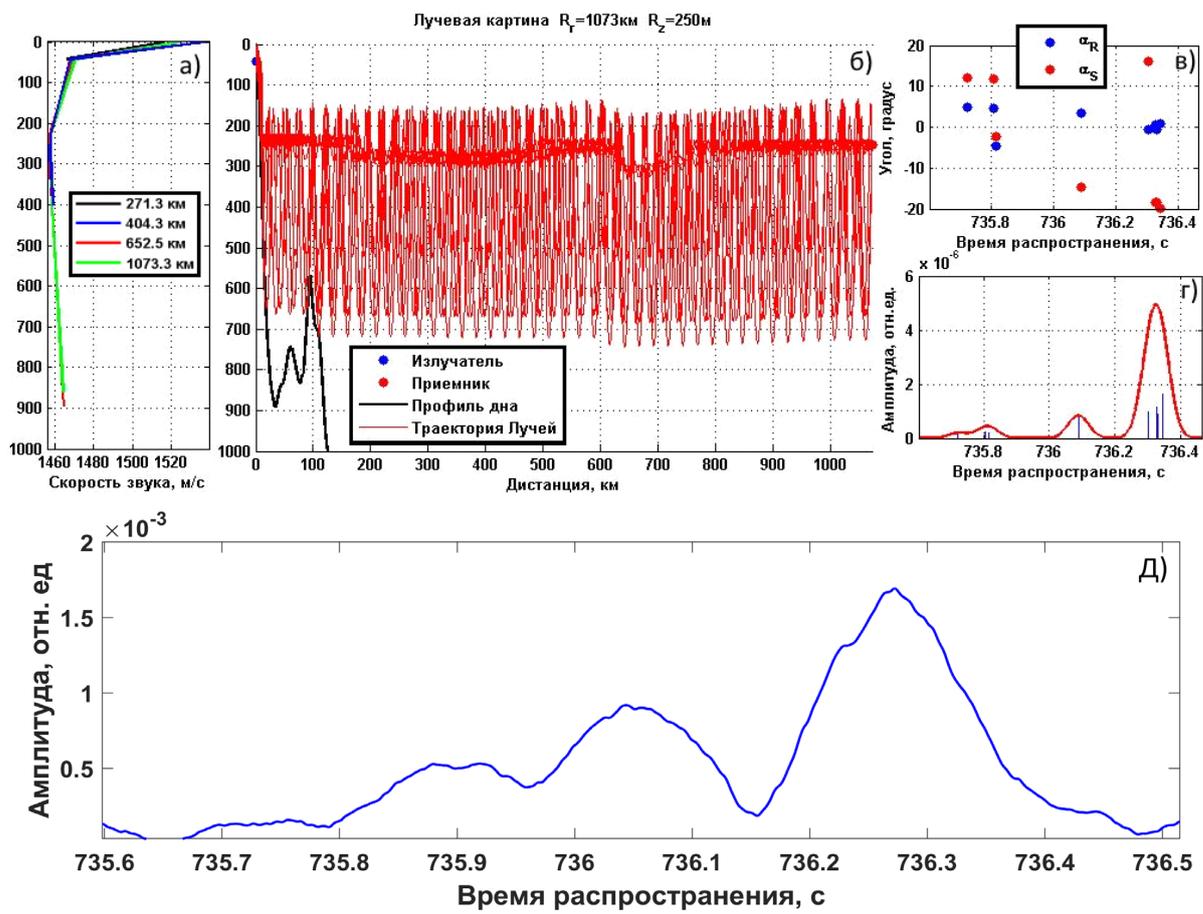


Рис. 8

ПОДПИСИ К ТАБЛИЦАМ

Таблица 1. Параметры сигналов

Таблица 2. Параметры зондирующих сигналов с центральной частотой 400 Гц

Таблица 1.

Обозначение	Длина, символов	Количество периодов несущей частоты на символ
M127_8	127	8
M127_20		20
M127_40		40
M127_100		100
M1023_4	1023	4
M1023_8		8
M1023_20		20
M1023_40;		40
M1023_100		100
M2047_8;	2047	8
M2047_20;		20
M2047_40		40
M2047_100		100

Таблица 2

сигналы	T, c	$T \times N, c$	$\Delta f, Гц$	$K_{теор}$	$K_{эсп}$	Вывод
M127_8	0.02	2.54	100	2.83	2.12	<i>низкая помехоустойчивость</i>
M127_20	0.05	6.35	40	3.88	2.67	<i>низкая помехоустойчивость</i>
M127_40	<i>0.1</i>	12.7	20	4.74	4.56	<i>низкая разрешающая способность</i>
M127_100	<i>0.25</i>	31.75	8	5.2	5.11	<i>низкая разрешающая способность</i>
M1023_4	0.01	10.23	200	5.34	2.36	<i>низкая помехоустойчивость /широкая полоса частот</i>
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	<i>0.1</i>	102.3	20	10.45	10.29	<i>низкая разрешающая способность /высокая помехоустойчивость</i>
M1023_100	<i>0.25</i>	255.75	8	11.38	3.92	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>
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	<i>0.1</i>	204.7	20	14.9	4.55	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>
M2047_100	<i>0.25</i>	511.75	8	17.14	3.89	<i>низкая разрешающая способность /чрезмерная длительность</i>