

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЧНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ В БАЗИСЕ ХАРТЛИ

## SIMULATION MODELING OF HYDROACOUSTIC BOUNDARY REVERBERATION SIGNAL IN HARTLEY BASIS

**M. Krutyakov  
I. Rozanov  
A. Sotnikov**

*Summary.* The method of simulation modeling of most specific signal in area of active hydrolocation — the signal of boundary reverberation — is proposed. Reverberation is being considered as a noise which significantly complicates target detection process because it has a spectrum correlated with useful signal. Practical application of model is advisable during modernization, control of algorithmical and onboard software functioning of real-time systems, training of neural-network-based software complexes of detection and guidance of underwater objects. Experiments on dispatch of obtained signals were held on the base of onboard control system of hydrolocational complex.

*Keywords:* Hydroacoustic boundary reverberation, simulation modeling, mathematical model, Hartley basis.

**Крутяков Михаил Андреевич**

Московский Государственный Технический  
Университет им. Н.Э. Баумана  
m.krutyakov@yandex.ru

**Розанов Иван Александрович**

Аспирант, Московский Государственный Технический  
Университет им. Н.Э. Баумана  
i.rozanov@protonmail.com

**Сотников Алексей Александрович**

К.т.н., доцент, Московский Государственный  
Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
sotnikov@bmmstu.ru

*Аннотация.* Предложен метод имитационного моделирования наиболее характерного в области активной гидролокации сигнала граничной реверберации. Реверберация рассматривается в качестве помехи, значительно усложняющей процесс обнаружения цели, так как имеет коррелированный с полезным сигналом спектр. Практическое применение модели целесообразно при модернизации, контроле функционирования алгоритмического и бортового программного обеспечения вычислительных систем реального времени, обучении нейросетевых программных комплексов обнаружения и сопровождения подводных объектов. Эксперименты по обработке полученных сигналов проводились на базе бортовой системы управления гидролокационного комплекса.

*Ключевые слова:* Гидроакустическая граничная реверберация, моделирование имитационное, модель математическая, базис Хартли.

## Введение

Одним из наиболее востребованных современных методов формирования внешних воздействий при испытаниях гидролокационных вычислительных систем реального времени является имитационное моделирование сигналов. Необходимость методов имитационного моделирования на предварительных этапах испытаний в настоящее время не подлежит сомнению. Высокая стоимость натурных экспериментов диктует разработчикам необходимость тщательной проработки алгоритмического и программного обеспечения в лабораторных условиях до выезда на испытательный полигон, а возможности гидрофизического моделирования сильно ограничены геометрическими размерами водного пространства, что, в частности, приводит к сильными паразитным переотражениям сигнала.

Обобщенные математические описания гидроакустических процессов представлены в работах Урика,

Ольшевского, Эттера [1–3]. Тем не менее, однозначного подхода к формированию адекватной модели гидроакустической обстановки в настоящий момент не существует. Это обусловлено и сложностью обобщенного формального описания гидроакустических процессов, и ограничением мощности вычислительной системы. Решение задачи формирования имитационной модели, функционирующей в режиме реального времени и адекватной конкретному применению, требует учета особенностей обработки полученного сигнала потребителем и ресурсов вычислительных средств.

В настоящей работе авторами предложен метод имитационного моделирования сигнала граничной гидроакустической реверберации с использованием базиса Хартли применительно к задаче обнаружения и сопровождения подводных объектов на глубинах от 200 до 800 метров и дальности до 5000 метров средствами активной гидролокации. В данной работе реверберация рассматривается в качестве помехи, значительно услож-

нящей процесс обнаружения цели, так как имеет коррелированный с полезным сигналом спектр.

Практическое применение модели может быть целесообразно при модернизации, контроле функционирования алгоритмического и бортового программного обеспечения вычислительных систем реального времени, обучении нейросетевых программных комплексов обнаружения и сопровождения подводных объектов.

При реализации метода имитационного моделирования на вход модели бортового вычислителя поступает имитационный сигнал гидроакустической обстановки. Факторами модели сигнала являются параметры объекта локации: дальность, азимут, угол места, взаимная радиальная скорость сближения с локатором, а также параметры водной среды: соленость, температура, давление (глубина). Для искажения измеряемых параметров сигнала используются математические модели стационарного и нестационарного случайных гидроакустических процессов с нормальным распределением амплитуд.

Анализ значения и особенностей сигнала граничной реверберации в задачах активной гидролокации

Реверберационная помеха является случайным нестационарным процессом, вызываемым рассеянием излученного информационной системой сигнала на статистических неоднородностях среды (пузырьки воздуха, водоросли, живые организмы в морской среде)

В гидроакустике реверберационную помеху часто разделяют на три основных вида:

- ◆ объемная реверберация, обусловленная рассеянием зондирующего сигнала на структурных, температурных и иных неоднородностях среды во всем объеме, озвучиваемом зондирующими сигналами;
- ◆ граничная или поверхностная реверберация, обусловленная рассеянием на неровностях границ среды, в которой происходит распространение акустических сигналов;
- ◆ реверберация от слоя, обусловленная рассеянием на неоднородностях, распределенных в относительно тонком слое, полностью охватываемом характеристикой направленности излучающей системы.

Основным параметром, характеризующим реверберацию, является интенсивность рассеяния, которая определяется, как отношение интенсивности звука, рассеянного по площади (для граничной реверберации) или объему (для объемной реверберации), к интенсивности исходного сигнала [3]:

$$S_{b,v} = 10 \lg \frac{I_s}{I_i},$$

где  $S_{b,v}$  — интенсивность рассеяния,  $I_s$  — интенсивность рассеянного сигнала,  $I_i$  — интенсивность исходного сигнала.

Важной особенностью реверберации, отличающей её от шумовых помех в целом, является то, что источником реверберации является сам гидролокатор, следовательно, основные спектральные характеристики реверберации приблизительно соответствуют спектральным характеристикам зондирующего сигнала; интенсивность реверберации зависит от рассеивания при отражении и интенсивности посылаемого сигнала.

Таким образом, граничная реверберация является одной из ключевых составляющих помехи в активной гидролокации. При использовании спектральных методов обработки сигнала сложно выделить данную помеху, поскольку она лежит в том же спектре, что и исходный сигнал, поэтому для правильной обработки гидролокационного сигнала важно иметь прежде всего адекватную модель поверхностной реверберации.

Анализ ограничений аддитивного подхода к формированию математической модели сигнала граничной реверберации во временной области

Одним из важных ограничений, связанных с использованием спектрального моделирования сигнала, является потеря фазы и формы сигнала во временной области при сохранении функции спектральной плотности мощности (ФСПМ) и автокорреляционной функции, а значит спектральное моделирование может быть использовано лишь тогда, когда обработка сигнала ведётся в спектральной области.

Такой вид обработки сигнала используется для зондирующих сигналов постоянной частоты (тонового сигнала) с применением временных окон для определения расстояния до объекта. При обработке необходимо учитывать влияние эффекта Доплера на распространяемый звуковой сигнал.

Существенное значение имеет вычислительная нагрузка модели на систему имитации сигнала. При расчете для снижения вычислительной сложности имитационного моделирования и перевода системы моделирования в класс систем реального времени сделаны следующие предположения и допущения:

- ◆ рассеивающие неоднородности являются точечными;
- ◆ расположение неоднородностей является дискретным;

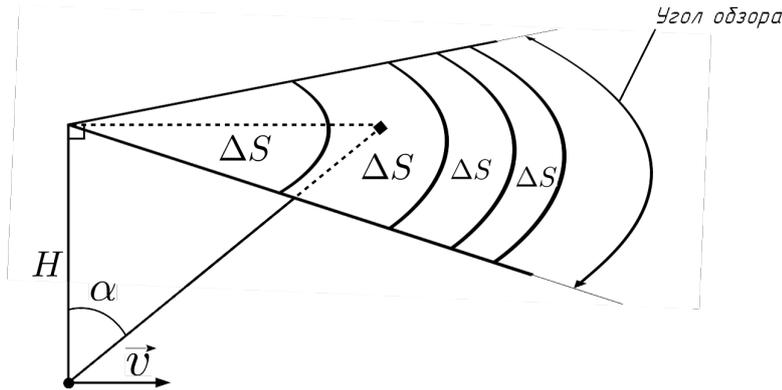


Рис. 1. Схема расположения зон неоднородностей

- ◆ неоднородности расположены в одной плоскости;
- ◆ вторичное рассеивание отсутствует;
- ◆ взаимное движение гидролокатора относительно объекта локации равномерно и прямолинейно.

В этом случае реверберацию можно представить канонической моделью [4] и описать соотношением

$$S_{rev}(t) = \sum_{i=1}^{N_{rev}} s_i(t, \alpha_{revi}, \gamma_{revi}, R_{revi}, v_{revi}),$$

где  $N_{rev}$  — количество элементарных рассеивателей;  $s_i$  — реверберационный сигнал от  $i$ -ого элементарного рассеивателя;

$\alpha_{revi}$  — азимут  $i$ -ого элементарного рассеивателя;

$\gamma_{revi}$  — угол места  $i$ -ого элементарного рассеивателя;

$R_{revi}$  — расстояние от приемной антенны до  $i$ -ого элементарного рассеивателя;

$v_{revi}$  — радиальная составляющая скорости гидролокатора относительно  $i$ -ого элементарного рассеивателя.

Для определения взаимного геометрического расположения элементарных рассеивателей и определения параметров выражения (1) поверхность неоднородностей условно разбивается на зоны равной площади  $\Delta S$  [5]. Каждой зоне неоднородностей ставится в соответствие точечный элементарный рассеиватель (рисунок 1).

Дальнейший расчет сигналов  $s(t)$  ведется исходя из предположения, что каждый элементарный рассеиватель является источником отраженного сигнала с учетом амплитудного затухания, обусловленным обратным рассеиванием и смещением частоты согласно закону Доплера. Коэффициент обратного рассеивания поверхностной реверберации определяется углом скольжения нормали волнового фронта к поверхности и волнением поверхности моря, либо типом грунта дна. На практике коэффициент обратного рассеивания, как правило, определяется на основе эмпирических данных.

Аддитивное наложение сигналов от всех рассеивателей в соответствии с (1) позволяет получить описание полного сигнала реверберации.

Варьирование параметра  $\Delta S$  и количества элементарных отражателей позволяет учитывать вычислительную нагрузку системы моделирования, обеспечивая приемлемую точность модели при обеспечении выполнения вычислений в режиме реального времени.

### Спектральный синтез сигнала граничной реверберации

Воспроизведение с помощью ЭВМ детерминированных сигналов не вызывает особых затруднений. Наиболее просто оно осуществляется, если известны аналитические зависимости изменения сигналов от параметров, влияющих на это изменение. В этом случае несложная программная реализация полученных зависимостей позволяет получить отсчеты воспроизводимых сигналов [6].

Для имитации детерминированных сигналов в рамках классической корреляционной теории исходными данными могут являться либо автоковариационная функция по ФСПМ. Полученная таким образом модель сигнала сохраняет свойства сигнала, но теряет точные значения в конкретный момент времени, и в то же время алгоритмическая и математическая сложность получения таких сигналов существенно ниже, чем при аддитивном методе имитационного моделирования во временной области [7].

Для детерминированных сигналов  $x(t)$ , определенных на конечном интервале времени длительностью  $T$  и имеющих заданные энергетические характеристики (функции спектральной плотности энергии или мощности), выборочные значения этих характеристик в частотных точках  $k\Delta w$ , где

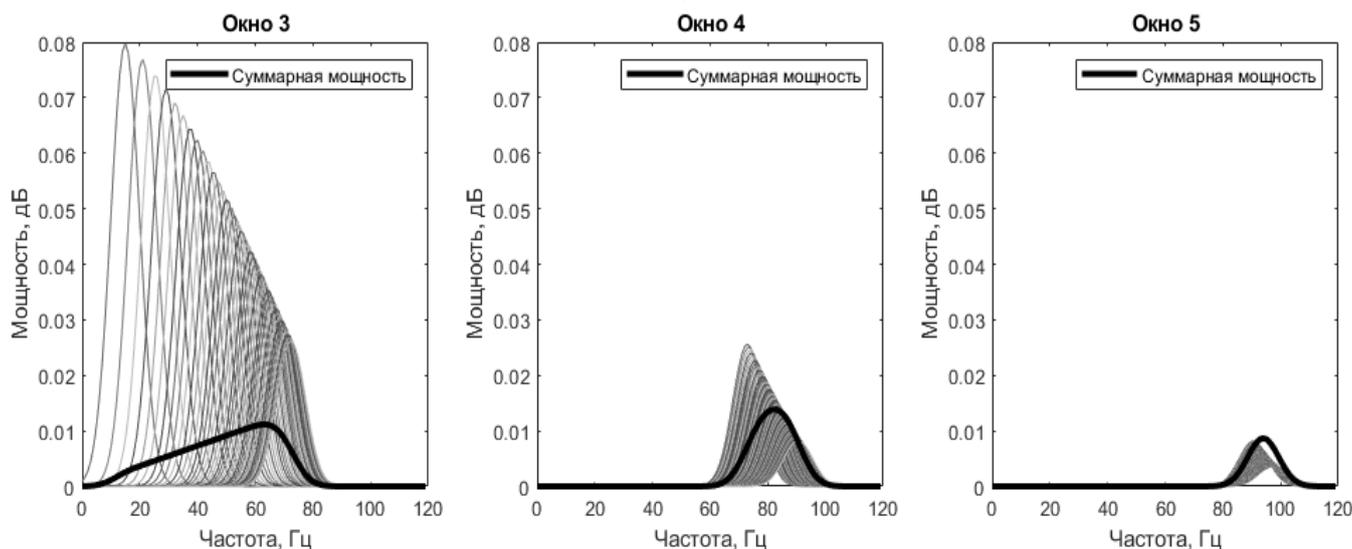


Рис. 2. Наложение ФСПМ отраженных сигналов элементарных рассеивателей

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T},$$

совпадают с точностью до значения величины  $T$  с коэффициентами спектрального представления сигнала в базисе Фурье. Поэтому алгоритмы имитации таких сигналов можно представить в виде непрерывных либо дискретных комплексных рядов Фурье. Используя же связь спектров в различных базисах, например, связь тригонометрических функций и функций Хартли, алгоритмы можно записать в виде действительных тригонометрических рядов и рядов Хартли.

Для имитации сигнала спектральными методами необходимо определить ФСПМ данного сигнала. Полагая, что на частоту сигнала каждого рассеивателя оказывает влияние достаточно большое количество независимых случайных процессов с одинаковыми параметрами распределения, на основании центральной предельной теоремы принято допущение, что ФСПМ сигнала каждого из отражателей на рисунке 1 распределена по нормальному закону.

Поскольку гидролокатор имеет ненулевую скорость  $v$ , необходимо учесть, что при распространении звука на частоту сигнала окажет влияние закон Доплера. Для расчета изменения частоты необходимо вычислить проекцию скорости на каждый элементарный отражатель. Рассчитаем изменение  $a_i$  при  $i = \overline{1, N}$  для элементарных отражателей по формуле:

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{H\sqrt{\pi}}{\sqrt{3 \cdot i \cdot \Delta S}}\right), \Delta S = \text{const}, i = \overline{1, N},$$

где  $H$  — глубина погружения гидролокатора,  $N$  — количество отсчетов.

Таким образом частота Доплера будет вычисляться по формуле:

$$f_D = f_0 \frac{c + v \cos(\alpha_i)}{c - v \cos(\alpha_i)}.$$

Необходимо также установить коэффициент затухания для каждого  $i$ -го отраженного сигнала. Согласно [8] при движении звуковой волны затухание пропорционально четвертой степени пройденного расстояния. Для расчета коэффициента затухания примем мощность сигнала, потерявшего наименьшее количество энергии, то есть сигнала, прошедшего по кратчайшему пути вертикально от гидролокатора до поверхности и от поверхности до гидролокатора в качестве мощности, при которой коэффициент затухания равен 1. Тогда зависимость коэффициента затухания от угла наклона гидролокатора к элементарному отражателю  $\alpha_i$  примет вид:

$$P_i = 10 \lg \frac{H \operatorname{cosec}(\alpha_0)}{(H \operatorname{cosec}(\alpha_i))^4}.$$

Принимая в качестве допущения то, что ФСПМ сигнала одного элементарного отражателя распределена по нормальному закону с математическим ожиданием, равным  $f_D$ , найдем суммарную мощность отраженного сигнала в соответствии с изменением частоты в разрезе временных окон, на которые делится временной сигнал при спектральном синтезе (рисунок 2). В тех временных

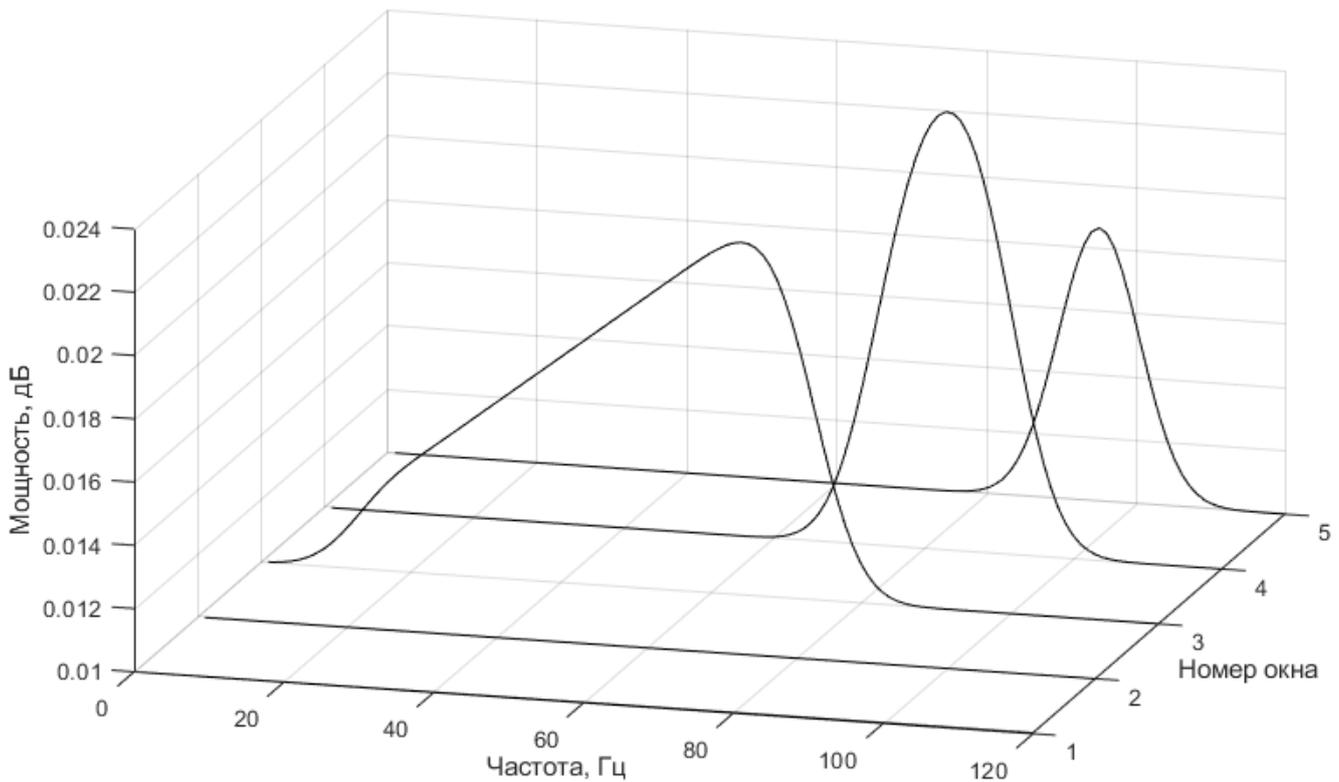


Рис. 3. Результаты формирования ФСПМ реверберационной помехи для различных временных окон

отрезках, в которых не зафиксировано получение отраженного сигнала в соответствии со скоростью распространения звука в воде, будем фиксировать лишь постоянную мощность белого шума. На рисунке 3 показано, как изменяется формируемая ФСПМ с течением времени.

Ключевыми параметрами для моделирования ФСПМ стали:

- ◆ угол обзора;
- ◆ глубина;
- ◆ скорость движения;
- ◆ количество замеров;
- ◆ частота излучателя;
- ◆ скорость звука в воде
- ◆ дисперсия при отражении;
- ◆ верхняя граница частоты;
- ◆ шаг по частоте;
- ◆ период дискретизации.

Грамотный выбор базиса, используемого для восстановления сигнала, позволяет уменьшить вычислительную сложность имитационного моделирования. Важной отличительной чертой базиса Хартли по сравнению, например, с тригонометрическим базисом, является получение действительного временного сигнала. Это позволяет уменьшить объем памяти, используемый для

хранения сигнала. Помимо этого, согласно [9-11] использование данной базисной функции позволяет сократить количество операций сложения и умножения до двух раз по сравнению с тригонометрическим и экспоненциальными базисами.

Функции Хартли образуются из простых тригонометрических функций обычным их сложением [12]:

$$\text{cas}\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) = \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{T} kt\right).$$

и определены на интервале длительностью  $T$ . Они ортонормированы и образуют полную базисную систему

$$\left\{ \text{cas}\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \right\}, k = 0, 1, \dots,$$

в которой справедливы следующие преобразования Хартли:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} X_x(k) \text{cas}\left(\frac{2\pi}{T} kt\right), t \in [0, T],$$

$$X_x(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \text{cas}\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) dt, k = 0, 1, \dots$$

Тригонометрическая спектральная модель детерминированного сигнала имеет вид тригонометрического

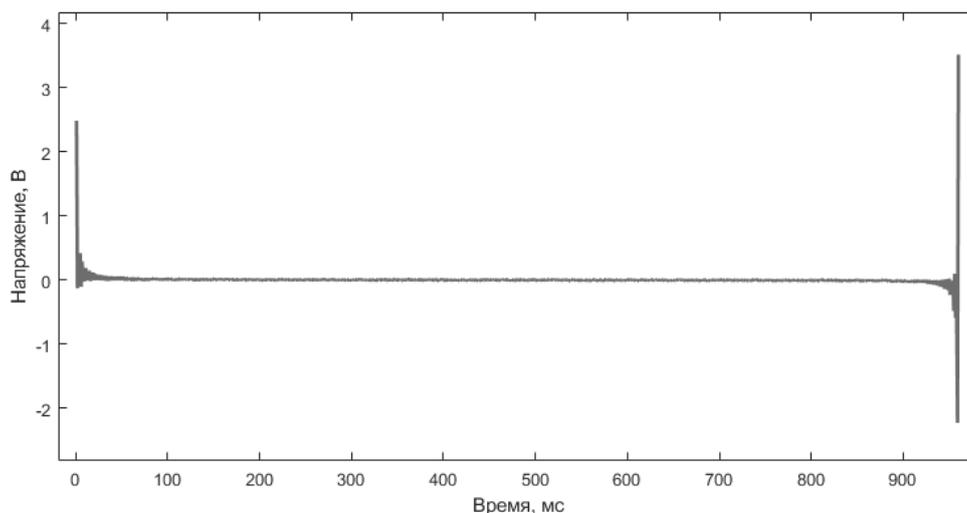


Рис. 4. Сигнал реверберационной помехи во временной области

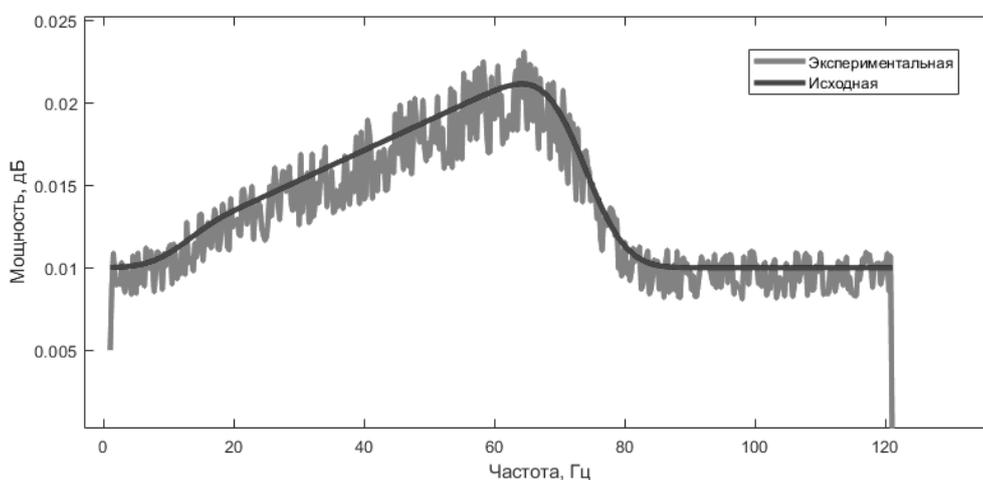


Рис. 5. Результаты моделирования ФСПМ сигнала реверберационной помехи

ряда Фурье, где четные тригонометрические коэффициенты  $\{X_{Тч}(k)\}$  совпадают с четными коэффициентами ряда Хартли и имеют следующий вид:

$$X_{Тч}(0) = \sqrt{\frac{Sp(0)}{2T}};$$

$$X_{Тч}\left(\frac{N}{2}\right) = \sqrt{\frac{Sp(\omega_B)}{2T}};$$

$$X_{Тч}(k) = \sqrt{\frac{Sp(2\pi k/T)}{T}},$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1$  для  $N$  — четного,

$k = 1, 2, 3, \dots, \frac{N-1}{2}$  для  $N$  — нечетного.

Для имитации временного сигнала в базисе Хартли воспользуемся формулой

$$x(i) = X_{Тч}(0) + \sum_{k=1}^{N/2-1} X_{Тч}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) =$$

$$= X_{Тч}(0) + \sum_{k=1}^{N/2} X_{Тч}(k) \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right],$$

$$i = \overline{0, N}. \quad (2)$$

Результаты имитационного моделирования

Для каждого из временных окон было проведено моделирование временного сигнала по формуле (2). На рисунке 4 приведен пример полученного временно-

го сигнала для третьего временного окна, показанного на рисунке 3.

Из рисунка видно, что временной сигнал имеет особую форму, характер которой связан с базисной функцией. Сравним периодограмму такого сигнала с исходной смоделированной ФСПМ рассматриваемого временно-го промежутка (рисунок 5).

Характер полученной ФСПМ сигнала совпадает с характером исходного сигнала, что позволяет говорить о том, что представленный метод моделирования применим для имитации реверберационного гидроакустического сигнала в случаях повышенного требования к скорости выполнения вычислений (например, вычисления в режиме реального времени).

### Заключение

В результате проведенного исследования разработана математическая модель и метод имитационного мо-

делирования сигнала гидроакустической реверберации в базе Хартли. Практическое применение модели может быть востребованным при модернизации, контроле функционирования алгоритмического и бортового программного обеспечения вычислительных систем реального времени, а также обучении нейросетевых программных комплексов обнаружения и сопровождения подводных объектов.

Эксперименты по обработке полученных имитационных сигналов проводились на базе бортовой системы управления гидролокационного комплекса, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а теоретические основы спектрального имитационного моделирования получены в рамках выполнения проекта 2.7782.2017/БЧ «Методы имитации детерминированных и случайных одномерных и многомерных сигналов в научных задачах моделирования информационно-управляющих систем реального времени», осуществляемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1978. — 448 с.
2. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. — Л.: Судостроение, 1983. — 280 с.
3. Paul C. Etter. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. — New York, Spon Press/Taylor & Francis, 2003. — 424 p.
4. Розанов И.А., Сотников А. А. Имитационное моделирование гидроакустических сигналов на промежуточной частоте // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-gidroakusticheskikh-signalov-na-promezhutochnoy-chastote> (дата обращения: 02.12.2018).
5. Долгов А. Н. Исследование и разработка математических моделей акустических сигналов и помех для гидроакустических тренажеров // Известия ЮФУ. Технические науки. 2003. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-i-razrabotka-matematicheskikh-modeley-akusticheskikh-signalov-i-pomehdlya-gidroakusticheskikh-trenazherov> (дата обращения: 02.12.2018).
6. Сотников А.А. Способ повышения эффективности вычислительных комплексов цифрового имитационного моделирования гидроакустической обстановки в реальном масштабе времени. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал 2013. № 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0213.0531784>.
7. Сюев В.В., Гуренко В. В., Смирнова Е. В. Спектральные алгоритмы имитации сигналов как учебно-методический инструмент подготовки инженеров. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 7. С. 21–33.
8. Принцип работы эхолотов [Электронный ресурс]. // Заречье. 2015. URL: <http://zarech63.ru/statyi/printsip-raboty-ekholotov> (дата обращения: 19.03.2018).
9. Malvar, Henrique. (1987). Erratum: Fast computation of discrete cosine transform through fast Hartley transform. Electronics Letters. 23. 608-. 10.1049/el:19870435
10. R. F. Ullman, An Algorithm for the Fast Hartley Transform, in Stanford Exploration Project reports 1984.
11. Сюев В.В., Гуренко В. В. Гармонические алгоритмы имитации сигналов в рамках корреляционной теории // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. № 4 (115). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/garmonicheskie-algoritmy-imitatsii-signalov-v-ramkah-korrelyatsionnoy-teorii> (дата обращения: 02.12.2018).
12. Bracewell R. The Hartley Transform. Oxford University Press, 1990. 175 p.
13. Сотников А.А., Якупов Ш. З., Романовский А. С. Применение имитационного моделирования для контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал 2013. № 6. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0613.0570096>.
14. Сюев В.В., Гуренко В. В. Описание и имитация псевдослучайных сигналов в рамках обобщенной корреляционной теории в одноосновных системах счисления // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал 2016. № 10. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/1016.0848907>.
15. Waite A.D. SONAR for Practising Engineers. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2002. 298 p.

© Крутяков Михаил Андреевич ( m.krutyakov@yandex.ru ),

Розанов Иван Александрович ( i.rozanov@protonmail.com ), Сотников Алексей Александрович ( sotnikov@bmstu.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»