

УДК 004.052.32

Имитационное моделирование гидроакустических сигналов на промежуточной частоте

Розанов И. А.¹, Сотников А. А.^{1,*}

*sotnikov@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложена математическая модель гидроакустического сигнала в точке приемной антенны гидролокационного комплекса на промежуточной частоте. Данная модель позволяет существенно сократить объем вычислений системы имитационного моделирования. Поскольку предлагаемая модель имеет обобщенный вид, предусмотрено ее модифицирование при помощи представленного в статье параметрического механизма управления вычислительной сложностью. Практическое применение модели предполагает модернизацию гидролокационных комплексов, контроль работоспособности аппаратуры бортовой системы управления гидролокационного комплекса.

Ключевые слова: модель математическая; комплекс гидролокационный; мощность вычислительная; моделирование имитационное, обстановка гидроакустическая; частота промежуточная

Введение

Совершенствование математического, алгоритмического и программного обеспечения современных гидролокационных комплексов невозможно представить без полунатурного моделирования работы их составных частей на этапах лабораторных и предварительных испытаний. Полнота тестового покрытия в этом случае во многом определяется адекватностью математической модели гидроакустической обстановки с учетом ограничения производительности вычислительной системы.

Именно ограничение производительности вычислительной системы комплекса имитационного моделирования зачастую не дает возможности прямого применения математических моделей, полученных в рамках фундаментальных исследований [1, 2, 3]. При описании практических методов имитационного моделирования гидролокационных сцен [4, 5], как правило, не в полной мере делается акцент на выполнение поставленной задачи в жестких рамках режима реального времени.

Авторами предложена математическая модель гидроакустического сигнала в точке приемной антенны гидролокационного комплекса на промежуточной частоте. Полученная модель позволяет существенно сократить объем вычислений системы имитационного модели-

рования и находит применение при модернизации гидролокационных комплексов, структурная реализация которых предполагает использование цифровых гетеродинированных сигналов в комплексном виде на входе бортового гидроакустического вычислителя [6]. Предложенная математическая модель имеет обобщенный вид, является расширяемой и может быть существенно модифицирована для адаптации под конкретную задачу с учетом необходимых допущений и наложенных ограничений. Предложен параметрический механизм управления вычислительной сложностью модели.

Практическое применение результатов исследования не ограничивается сферами разработки и модернизации алгоритмического и программного обеспечения, а может использоваться и при контроле функционирования аппаратуры бортовой системы управления гидролокационного комплекса на заводе-изготовителе в рамках приёмосдаточных испытаний. В этом случае имитационный гидроакустический сигнал следует рассматривать в качестве стимула перевода графа состояний изделия в различные режимы, а гибкость управления параметрами объекта локации и водной среды позволяет реализовать полное тестовое покрытие всех состояний системы [7, 8].

1. Структурная схема подсистемы акустики и способ снижения требований к вычислительной системе имитационного моделирования

В данной работе рассматривается подсистема акустики гидролокационного комплекса, состоящая из блока гидрофонов, блока антенного, блока обработки и управления. Пример типовой структурной схемы подсистемы акустики приведен на рис. 1.

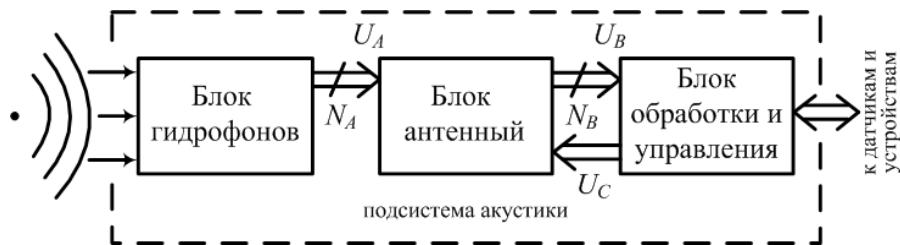


Рис. 1. Структурная схема подсистемы акустики гидролокационного комплекса

Гидроакустический сигнал принимается гидрофоном и преобразуется в электрический сигнал, который поступает на вход блока антенного, где реализован квадратурный демодулятор (рис. 2). В результате преобразования на вход блока обработки информации и управления по командам запросов U_C поступает цифровой массив комплексных данных сигнала на промежуточной частоте U_B размерностью N_B .

В соответствии с теоремой Котельникова любой непрерывный сигнал с финитным спектром может быть представлен в виде отсчетов дискретного сигнала с частотой дискретизации $f_d > 2f_0$, где f_0 — верхняя предельная частота непрерывного сигнала.

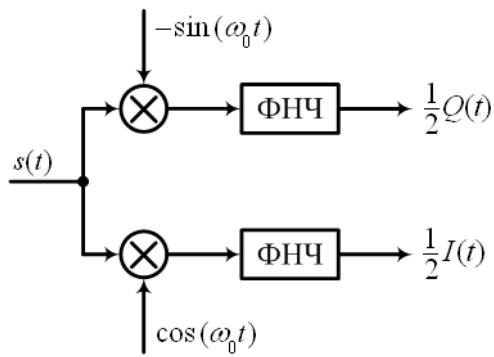


Рис. 2. Функциональная схема квадратурного демодулятора подсистемы акустики гидролокационного комплекса

Размерность массива отсчетов имитируемого цифрового сигнала U_A , вычисленного за единицу модельного времени определяется выражением

$$N_A = 2f_{A0}N_G, \quad (1)$$

где f_{A0} — верхняя предельная частота непрерывного сигнала U_A ; N_G — количество гидрофонов в подсистеме акустики.

Аналогично (1) определим размерность N_B массива отсчетов имитируемого дискретного сигнала U_B , вычисленного за единицу модельного времени

$$N_B = 4f_{B0}N_G, \quad (2)$$

где f_{B0} — верхняя предельная частота непрерывного сигнала U_B .

Таким образом, существенного снижения объема имитируемых данных можно достигнуть в том случае, если моделирование цифрового гидроакустического сигнала выполнять в комплексном виде на промежуточной частоте [6]. Эффективность применения способа определяется соотношением размерностей массивов отсчетов цифровых сигналов U_A и U_B . Учитывая (1) и (2), отношение K_N размерностей массивов N_A и N_B определяется выражением

$$K_N = \frac{f_{A0}}{2f_{B0}}.$$

Таким образом, если структура подсистемы акустики гидролокационного комплекса позволяет направить цифровой поток имитированных гидроакустических сигналов на блок обработки информации и управления в виде синфазной и квадратурной составляющих, то минимально необходимое количество формируемых отсчетов цифрового сигнала в единицу времени сокращается в K_N раз, что имеет существенное значение для увеличения точности математической модели и обеспечения функционирования комплекса имитационного моделирования в режиме реального времени.

2. Аддитивный подход к формированию математической модели гидроакустического сигнала в точке приемной антенны

Согласно [1], модель гидроакустической обстановки можно считать аддитивной, основные составляющие подсистемы можно классифицировать на пять основных групп:

- физические характеристики источников акустических полей (посылки зондирующих сигналов, волнение водной поверхности, атмосферные явления, жизнедеятельность организмов, ходовые помехи судов);
- океанологические характеристики (химический состав воды, температура, динамика водных масс, структура дна, волнение поверхности) и физические характеристики объектов локации (структурные, физико-химические характеристики, параметры движения);
- акустические характеристики источников полей (акустические характеристики океана, объектов локации, управляемых и неуправляемых источников);
- акустические поля (определение гидроакустического сигнала в требуемой точке водного пространства);
- параметры приемного устройства (геометрическую форму и размеры антенной решетки, параметры аналого-цифрового преобразователя, паразитные шумы в каналах передачи информации от гидрофонов).

На рис. 3 приведена схема обобщенной инфологической модели результирующего гидролокационного сигнала.

В общем случае каждая подсистема описывается вектор-функцией векторного аргумента. Преобразование одних вектор-функций в другие осуществляется с помощью операторов, в общем случае зависящих от других вектор-функций.

Физические характеристики источников акустических можно разбить на две подсистемы: физические характеристики управляемых $\vec{P}_S(\vec{\varphi}_1)$ и неуправляемых источников $\vec{P}_N(\vec{\varphi}_2)$ акустических полей.

Полагая, что океанологические характеристики описываются с помощью вектор-функции $\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)$, а физические характеристики объектов локации — с помощью вектор-функции $\vec{P}_O(\vec{\varphi}_4)$, запишем выражения для:

вектор-функции акустических характеристик управляемых источников

$$\vec{A}_S(\vec{\Psi}_1) = \vec{Q}_{PAS}(\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)) \vec{P}_S(\vec{\varphi}_1),$$

где \vec{Q}_{PAS} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{P}_S(\vec{\varphi}_1)$ в $\vec{A}_S(\vec{\Psi}_1)$ и зависящий от вектор-функции $\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)$, описывающей океанологические характеристики;

вектор-функции акустических характеристик неуправляемых источников

$$\vec{A}_N(\vec{\Psi}_2) = \vec{Q}_{PAN}(\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)) \vec{P}_N(\vec{\varphi}_2),$$

где \vec{Q}_{PAN} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{P}_N(\vec{\varphi}_2)$ в $\vec{A}_N(\vec{\Psi}_2)$ и зависящий от вектор-функции $\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)$, описывающей океанологические характеристики;

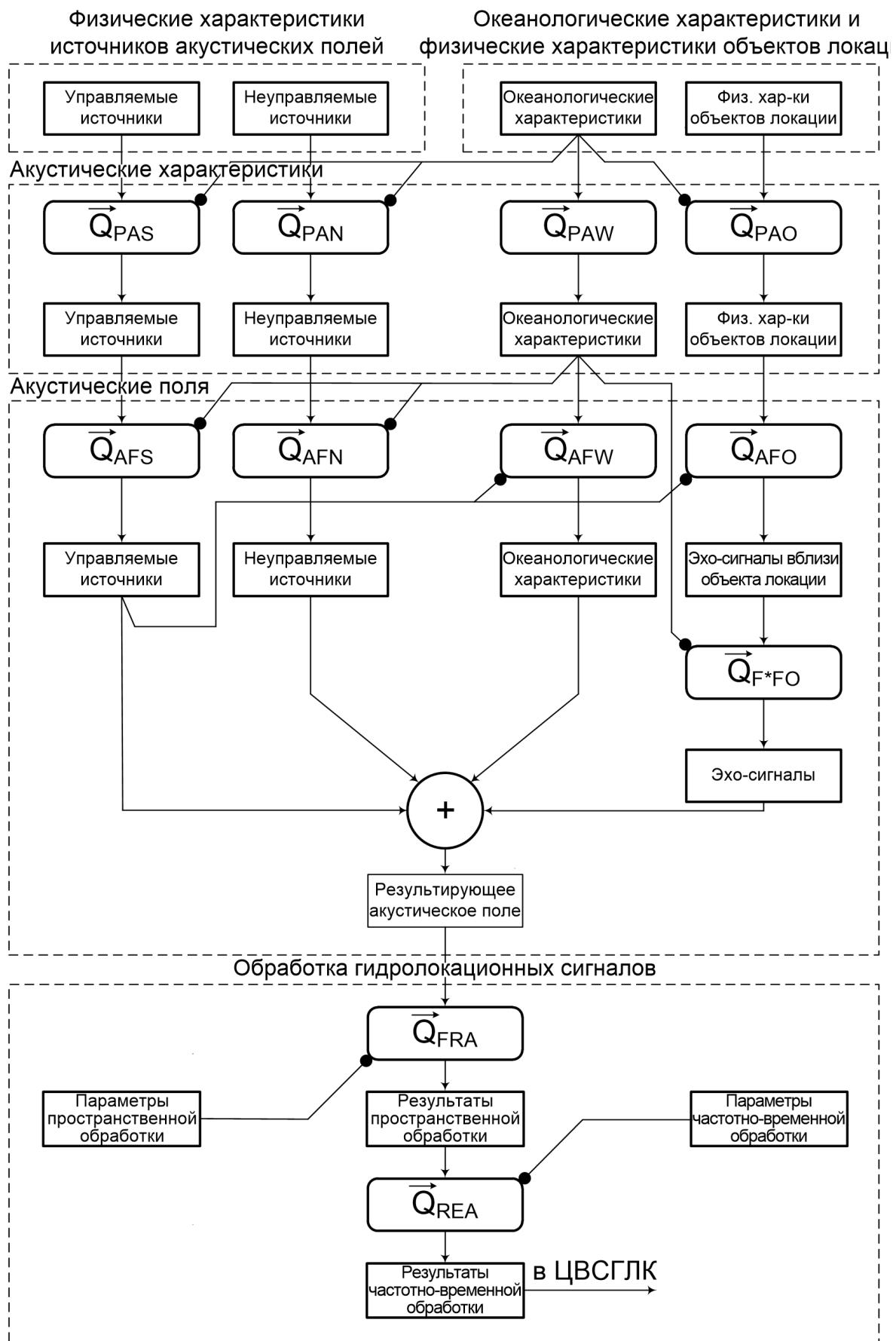


Рис. 3. Схема инфологической модели результирующего гидролокационного сигнала

вектор-функции акустических характеристик океана

$$\vec{A}_W(\Psi_3) = \vec{Q}_{PAW}(\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)) \vec{P}_W(\vec{\varphi}_3),$$

где \vec{Q}_{PAW} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)$ в $\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)$;

вектор-функции акустических характеристик объектов локации

$$\vec{A}_O(\vec{\Psi}_4) = \vec{Q}_{PAO}(\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)) \vec{P}_O(\vec{\varphi}_4),$$

где \vec{Q}_{PAO} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{P}_O(\varphi_4)$ в $\vec{A}_O(\Psi_4)$ и зависящий от вектор-функции $\vec{P}_W(\vec{\varphi}_3)$, описывающей океанологические характеристики.

Акустические поля определяют связь управляемых и неуправляемых источников сигнала, океанологических характеристик и физических характеристик объектов локации, формируют гидроакустический сигнал в заданной точке водного пространства.

Акустическое поле, создаваемое управляемыми источниками, определено выражением

$$\vec{F}_S(\vec{\sigma}) = \vec{Q}_{AFS}(\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)) \vec{A}_S(\vec{\Psi}_1), \quad (3)$$

где \vec{Q}_{AFS} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{A}_S(\Psi_1)$ в $\vec{F}_S(\vec{\sigma})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)$, описывающей акустические характеристики океана.

Акустическое поле, создаваемые неуправляемыми источниками, определено выражением

$$\vec{F}_N(\vec{\sigma}) = \vec{Q}_{AFN}(\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)) \vec{A}_N(\vec{\Psi}_2), \quad (4)$$

где \vec{Q}_{AFN} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{A}_N(\vec{\Psi}_2)$ в $\vec{F}_N(\vec{\sigma})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)$, описывающей акустические характеристики океана.

Акустическое поле океанской реверберации определено выражением

$$\vec{F}_W(\vec{\sigma}) = \vec{Q}_{AFW}(\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3), \vec{F}_S(\vec{\sigma})) \vec{A}_W(\vec{\Psi}_3), \quad (5)$$

где \vec{Q}_{AFW} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{A}_W(\vec{\sigma})$ в $\vec{F}_W(\vec{\sigma})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)$ и $\vec{F}_S(\vec{\sigma})$, описывающей акустические характеристики океана.

Акустическое поле эхо-сигнала объекта локации определено выражением

$$\vec{F}_O(\vec{\sigma}) = \vec{Q}_{AFO}(\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3), \vec{F}_S(\vec{\sigma})) \vec{A}_O(\vec{\Psi}_4), \quad (6)$$

где \vec{Q}_{AFO} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{A}_O(\vec{\sigma})$ в $\vec{F}_O(\vec{\sigma})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{A}_W(\vec{\Psi}_3)$ и $\vec{F}_S(\vec{\sigma})$, описывающей акустические характеристики объекта локации.

Результирующее акустическое поле формируется суперпозицией акустических полей, описанных выражениями (3)–(6):

$$\vec{F}_\Sigma(\vec{\sigma}) = \vec{F}_S(\vec{\sigma}) + \vec{F}_N(\vec{\sigma}) + \vec{F}_W(\vec{\sigma}) + \vec{F}_O(\vec{\sigma}).$$

Пусть параметры пространственной обработки акустических полей описываются с помощью вектор-функции $\vec{P}_R(\vec{\varphi}_5)$, а параметры частотно-временной обработки акустических полей описываются с помощью вектор-функции $\vec{P}_E(\vec{\varphi}_6)$, тогда выходной сигнал подсистемы пространственной обработки определяется выражением

$$\vec{R}_A(\vec{\nu}) = \vec{Q}_{FRA}(\vec{P}_R(\vec{\varphi}_5)) \vec{F}_\Sigma(\vec{\sigma}),$$

где \vec{Q}_{FRA} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{F}_\Sigma(\vec{\sigma})$ в $\vec{R}_A(\vec{\nu})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{P}_R(\vec{\varphi}_5)$, описывающей параметры пространственной обработки сигнала акустической системой.

Выходной сигнал подсистемы частотно-временной обработки определяется вектор-функцией

$$\vec{E}_A(\vec{\mu}) = \vec{Q}_{REA}(\vec{P}_E(\vec{\varphi}_6)) \vec{R}_A(\vec{\nu}),$$

где \vec{Q}_{REA} — векторный оператор, отображающий вектор-функцию $\vec{R}_A(\vec{\nu})$ в $\vec{E}_A(\vec{\mu})$ и зависящий от вектор-функции $\vec{P}_E(\vec{\varphi}_6)$, описывающей параметры частотно-временной обработки сигнала акустической системой.

Полученный выходной сигнал $\vec{R}_E(\vec{\mu})$ является результирующим в рассматриваемой модели и является входным потоком данных для бортового вычислителя гидролокационного комплекса.

Применение способа моделирования гидроакустической обстановки на промежуточной частоте в точке приемной антенны трансформирует схему, приведенную на рис. 3, к виду, представленному на рис. 4.

При таком подходе математическое моделирование каждого из источников сигнала $\vec{E}_S(\vec{\mu})$, $\vec{E}_N(\vec{\mu})$, $\vec{E}_W(\vec{\mu})$, $\vec{E}_O(\vec{\mu})$ производится по отдельности в точке приемной антенны на промежуточной частоте, после чего формируется результирующий сигнал

$$\vec{E}_\Sigma(\vec{\mu}) = \vec{E}_S(\vec{\mu}) + \vec{E}_N(\vec{\mu}) + \vec{E}_W(\vec{\mu}) + \vec{E}_O(\vec{\mu}).$$

Необходимо иметь в виду, что применение данного способа моделирования позволяет не учитывать затухание сигнала, так как антенный блок реализует временную автоматическую регулировку усиления, но имеет ряд ограничений:

- структурная реализация гидролокационного комплекса должна позволять ввод цифрового потока имитируемых гидролокационных данных на промежуточной частоте в аппаратуру гидроакустического вычислителя;
- преобразования гидроакустического сигнала в цифровой вид должны носить линейный характер.

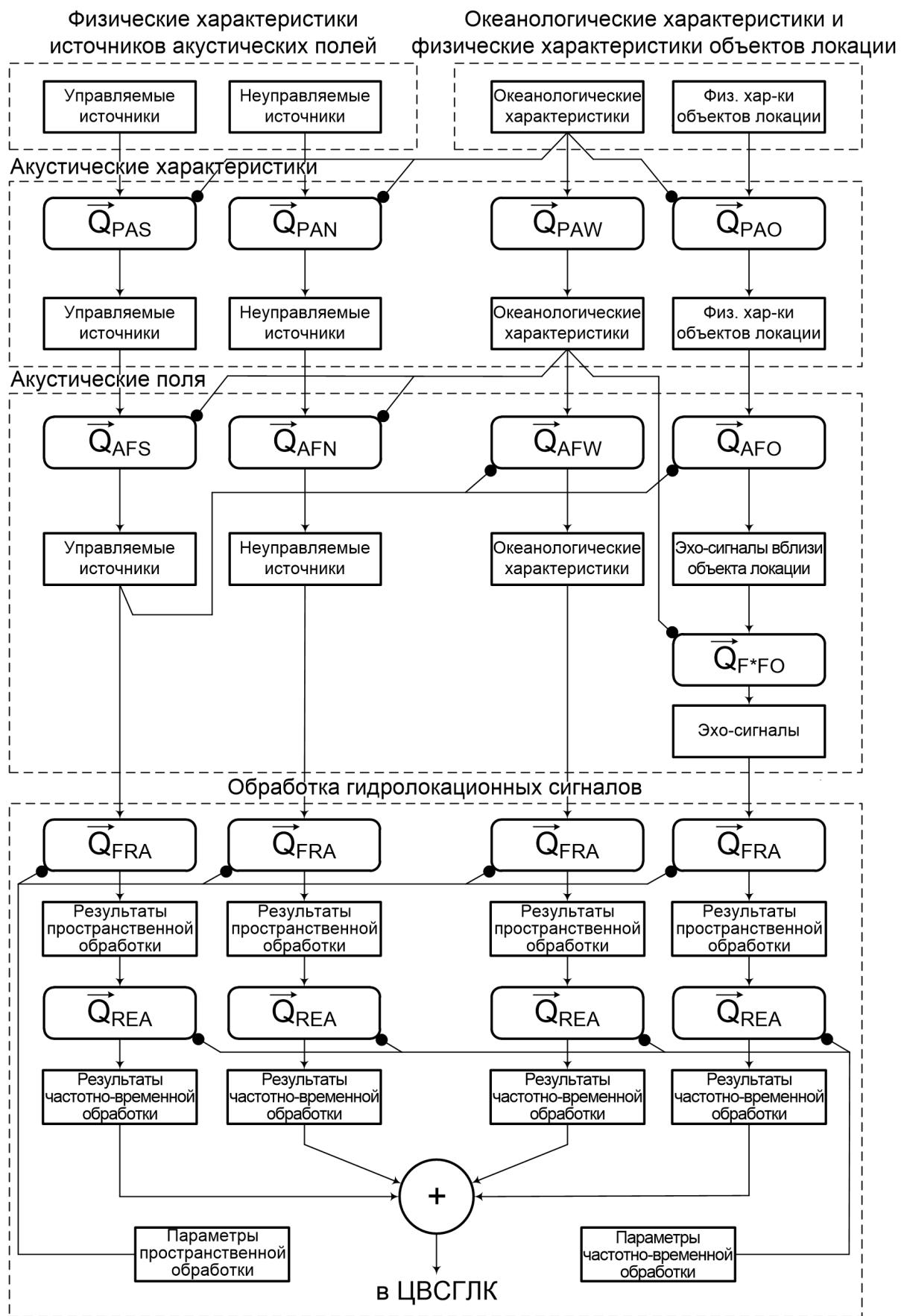


Рис. 4. Схема инфологической модели результирующего гидролокационного сигнала на промежуточной частоте

Очевидно, что последнее ограничение, строго говоря, не может быть выполнено из-за несовершенства технической реализации гидроакустической системы, поэтому пренебрежение погрешностями временной автоматической регулировкой усиления, шумами электрического тракта и квантования, нелинейностью фазо-частотной и отклонением крутизны амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот, временной задержкой следует отнести к допущениям данного способа. Идеализация приемного тракта имеет смысл в том случае, если условие функционирования комплекса в режиме реального времени более существенно для обеспечения адекватности модели, нежели инструментальная погрешность обработки сигнала.

Применение имитационного моделирования позволяет варьировать параметры системы в достаточно широких пределах. Для обеспечения выполнения требований по производительности и адекватности проектируемой модели необходимо правильно выбрать вид вектор-функции каждой из описанных выше подсистем, а также операторы преобразования вектор-функций.

В данной статье в качестве примера авторами рассмотрено моделирование двух видов наиболее характерных для рассматриваемой области гидролокации элементарных сигналов: отраженный сигнал зондирующей посылки гиперболического частотно-моделируемого (ГЧМ) сигнала и поверхностная реверберация. Другие сигналы могут быть получены аналогичным образом.

3. Математическая модель отраженного зондирующего сигнала

Практическое применение сложного зондирующего сигнала в виде ГЧМ-импульса обусловлено его хорошей разрешающей способностью по времени и «устойчивостью» к эффекту Доплера. Величину девиации частоты при этом выбирают, как правило, исходя из максимального ожидаемого смещения частоты зондирующего сигнала.

Математическое описание зондирующего сигнала для ГЧМ-импульса определяется выражением

$$S_{\text{hfm}}(t) = A(t) \cos \varphi(t), \quad (7)$$

где $\varphi(t)$ — зависимость фазы зондирующего сигнала от времени; $A(t)$ — зависимость амплитуды зондирующего сигнала от времени.

Модуляция частоты ГЧМ-импульса выполняется согласно выражению

$$f(t) = \frac{1}{T_{\text{high}} + \frac{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}}{\tau} t}, \quad (8)$$

где T_{high} — величина обратной верхней границе девиации частоты f_{high} ; T_{low} — величина обратной нижней границе девиации частоты f_{low} .

Для частотно-модулированных в соответствии с выражением (8) сигналов закон изменения фазы определяется соотношением

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \int_0^t w(t) dt = 2\pi \int_0^t \frac{1}{T_{\text{high}} + \frac{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}}{\tau} t} dt = \\ &= \frac{2\pi\tau}{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}} \ln\left(\frac{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}}{\tau} t + T_{\text{high}}\right) \Big|_0^t = \frac{2\pi\tau}{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}} \ln\left(\frac{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}}{T_{\text{high}}\tau} t + 1\right) = \\ &= \frac{2\pi\tau f_{\text{low}} f_{\text{high}}}{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}} \ln\left(\frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{low}}\tau} t + 1\right).\end{aligned}\quad (9)$$

С учетом формулы (9) описание исходного сигнала (7) для принятого гидролокатором отраженного сигнала преобразуется в выражение

$$S'_{\text{hfm}}(t) = A'(t - t_s) \cos\left(\frac{2\pi\tau f_{v,\text{low}} f_{v,\text{high}}}{f_{v,\text{high}} - f_{v,\text{low}}} \ln\left(\frac{f_{v,\text{high}} - f_{v,\text{low}}}{f_{v,\text{low}}\tau} (t - t_s) + 1\right)\right), \quad (10)$$

где $f_{v,\text{low}}$, $f_{v,\text{high}}$ — нижняя и верхняя границы девиации частоты ГЧМ-сигнала, смещенные вследствие эффекта Доплера.

Математическое описание сигнала (10) после квадратурной обработки в блоке антенном для ГЧМ-посылки имеет вид

$$Z_{hfm}(t) = A(t - t_s) \cdot \exp\left(\frac{2\pi j\tau f_{v,\text{low}} f_{v,\text{high}}}{f_{v,\text{high}} - f_{v,\text{low}}} \ln\left(\frac{f_{v,\text{high}} - f_{v,\text{low}}}{f_{v,\text{low}}\tau} (t - t_s) + 1\right)\right). \quad (11)$$

Учтем выражения для временной задержки сигнала

$$t_s = \frac{2D}{C_w}$$

и доплеровского смещения частоты

$$f_v = f_0\left(1 + \frac{v}{C_w}\right),$$

где D — расстояние до объекта локации; C_w — скорость распространения звука в водной среде; v — радиальная составляющая относительной скорости движения объекта локации.

Тогда выражение (11) в дискретной форме для периода дискретизации T_d будет иметь вид

$$\begin{aligned}Z_{\text{hfm}}(nT_d) &= \\ &= \begin{cases} A\left(nT_d - \frac{2D}{C_w}\right) \exp\left(\frac{2\pi j\tau f_{\text{low}} f_{\text{high}}\left(1 + \frac{2v}{C_w}\right)}{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}} \ln\left(\frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{low}}\tau} \left(nT_d - \frac{2D}{C_w}\right) + 1\right)\right), & 0 \leq n \leq \frac{\tau}{T_d}; \\ 0, & \frac{\tau}{T_d} < n < \frac{T_{\text{max}}}{T_d}. \end{cases}\end{aligned}\quad (12)$$

для $n \in N$.

Выделяя действительную и мнимую составляющие комплексного сигнала (12), получим математическую модель оцифрованного эхо-сигнала ГЧМ-посылки на входе блока обработки и управления:

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{hfm}}(nT_d)) = \begin{cases} A \left(nT_d - \frac{2D}{C_w} \right) \cos \left(\frac{2\pi\tau f_{\text{low}} f_{\text{high}} \left(1 + \frac{2v}{C_w} \right)}{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}} \times \right. \\ \quad \left. \times \ln \left(\frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{low}}\tau} \left(nT_d - \frac{2D}{C_w} \right) + 1 \right) \right), & 0 \leq n \leq \frac{\tau}{T_d}; \\ 0, & \frac{\tau}{T_d} < n < \frac{T_{\max}}{T_d}, \end{cases}$$

для $n \in N$;

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{hfm}}(nT_d)) = \begin{cases} A \left(nT_d - \frac{2D}{C_w} \right) \sin \left(\frac{2\pi\tau f_{\text{low}} f_{\text{high}} \left(1 + \frac{2v}{C_w} \right)}{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}} \times \right. \\ \quad \left. \times \ln \left(\frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{low}}\tau} \left(nT_d - \frac{2D}{C_w} \right) + 1 \right) \right), & 0 \leq n \leq \frac{\tau}{T_d}; \\ 0, & \frac{\tau}{T_d} < n < \frac{T_{\max}}{T_d}, \end{cases} \quad (13)$$

для $n \in N$.

4. Математическая модель поверхностной реверберации

При разработке математической модели поверхностной реверберации с целью снижения вычислительной сложности имитационного моделирования сделаны следующие предположения и допущения:

- рассеивающие неоднородности являются точечными;
- расположение неоднородностей является дискретным;
- 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 и описать соотношением

$$S_{\text{rev}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{rev}}} s_i(t, \alpha_{\text{rev},i}, \gamma_{\text{rev},i}, R_{\text{rev},i}, v_{\text{rev},i}), \quad (14)$$

где N_{rev} — количество элементарных рассеивателей; s_i — реверберационный сигнал от i -го элементарного рассеивателя; $\alpha_{\text{rev},i}$ — азимут i -го элементарного рассеивателя; $\gamma_{\text{rev},i}$ — угол места i -го элементарного рассеивателя; $R_{\text{rev},i}$ — расстояние от приемной антенны до

i -го элементарного рассеивателя; $v_{\text{rev},i}$ – радиальная составляющая скорости гидролокатора относительно i -го элементарного рассеивателя.

Для определения взаимного геометрического расположения элементарных рассеивателей и определения параметров выражения (14) поверхность неоднородностей условно разбивается на две зоны (рис. 5):

- ближняя зона неоднородностей (БЗН);
- дальняя зона неоднородностей (ДЗН).

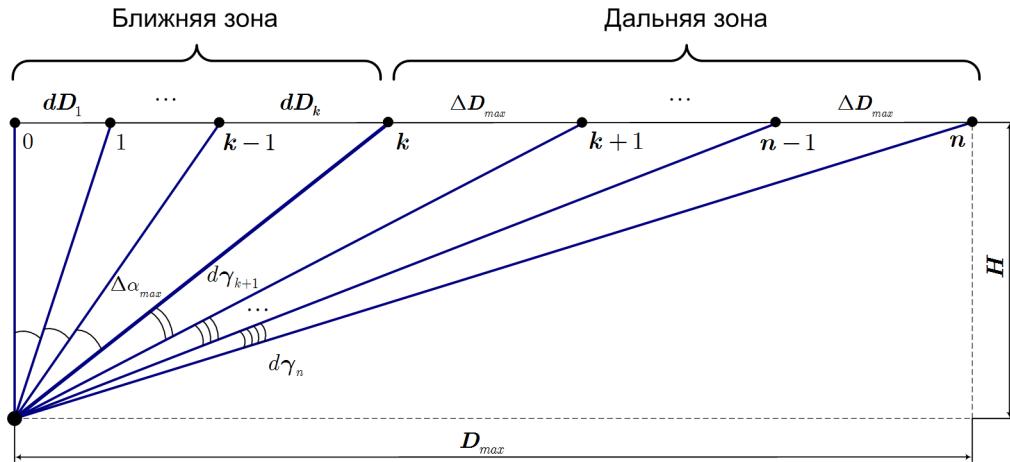


Рис. 5. Близкая и дальняя зоны неоднородностей при определении геометрического расположения элементарных рассеивателей

На рис. 5 используются следующие обозначения:

H — глубина хода гидролокатора;

D_{\max} — максимальная дальность обнаружения гидролокатора;

$0, 1, \dots, k$ — порядковые номера элементарных рассеивателей БЗН;

$k + 1, \dots, n$ — порядковые номера элементарных рассеивателей ДЗН;

$\Delta\alpha_{\max}$ — максимально допустимое угловое расстояние между элементарными рассеивателями;

ΔD_{\max} — максимально допустимое линейное расстояние между элементарными рассеивателями;

$\Delta\gamma_i$ — угловое расстояние между элементарными рассеивателями в ДЗН;

ΔD_i — линейное расстояние между элементарными рассеивателями в БЗН.

Расстояние между элементарными рассеивателями ΔD_i в БЗН определяется максимально допустимым угловым расстоянием между рассеивателями $\Delta\alpha_{\max}$, в ДЗН — принимается постоянным и равно максимально допустимому ΔD_{\max} .

Для БЗН справедливо выражение

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i = \Delta\alpha_{\max}, \\ \Delta D_i \leq \Delta D_{\max}, & i \leq k. \\ \Delta D_{k+1} > \Delta D_{\max}, \end{cases}$$

Для ДЗН справедливо выражение

$$\begin{cases} \Delta D_i = \Delta D_{\max}, \\ (n - k)\Delta D_{\max} + \sum_{j=1}^k \Delta D_j < D_{\max}, \end{cases} \quad i > k.$$

Распределение элементарных рассеивателей в плоскости неоднородностей показано на рис. 6.

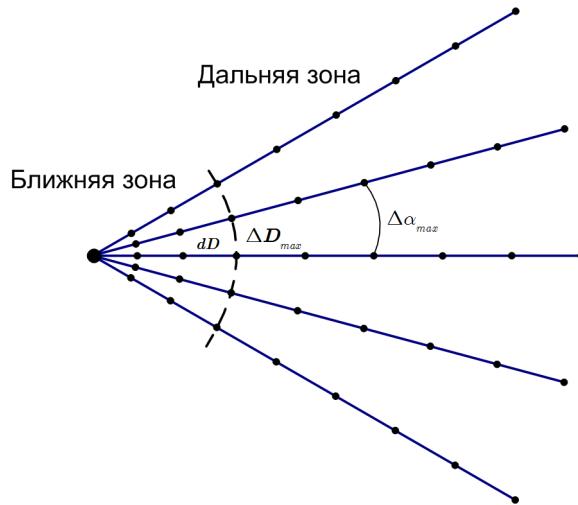


Рис. 6. Распределение элементарных рассеивателей в плоскости неоднородностей

Угловой диапазон по азимуту, в котором расположены элементарные рассеиватели, соответствует максимальному сектору приема локатора α_{\max} и симметричен относительно вектора скорости гидролокатора. Угловое расстояние по азимуту между соседними рассеивателями равно максимально допустимому угловому расстоянию $\Delta\alpha_{\max}$.

Ниже приведен расчет параметров элементарных рассеивателей для БЗН.

Приращение угла места i -го элементарного рассеивателя относительно $(i - 1)$ -го равно максимально допустимому угловому расстоянию, т.е.

$$\Delta\gamma_i = \Delta\alpha_{\max}, \quad i \leq k.$$

Приращение дальности до i -го элементарного рассеивателя относительно $(i - 1)$ -го определяется выражением

$$\Delta D_i = H \left(\operatorname{tg}(k\Delta\alpha_{\max}) - \operatorname{tg}((k - 1)\Delta\alpha_{\max}) \right), \quad i \leq k.$$

Радиальная скорость i -го элементарного рассеивателя относительно гидролокатора при $\alpha_i = 0$ определяется выражением

$$v_{i0} = v \cos \left(\frac{\pi}{2} - k\Delta\alpha_{\max} \right) = v \sin(k\Delta\alpha_{\max}), \quad i \leq k. \quad (15)$$

С учетом выражения (15) радиальная скорость произвольного i -го элементарного рассеивателя относительно гидролокатора определяется формулой

$$v_{\text{rev},i} = v \sin(k\Delta\alpha_{\max}) \cos(\alpha_{\text{rev},i}), \quad i \leq k.$$

Наклонная дальность до i -го элементарного рассеивателя определяется выражением

$$R_{\text{rev},i} = \frac{H}{\cos(k\Delta\alpha_{\max})}, \quad i \leq k.$$

Аналогичным образом осуществляется расчет параметров элементарных рассеивателей для ДЗН.

Приращение дальности до i -го элементарного рассеивателя относительно $(i-1)$ -го определяется выражением

$$\Delta D_i = \Delta D_{\max}, \quad i > k.$$

Приращение угла места i -го элементарного рассеивателя относительно $(i-1)$ -го равно максимально допустимому угловому расстоянию, т.е.

$$\Delta\gamma_i = \arctg\left(\frac{k\Delta D_{\max} + \sum_{j=1}^k \Delta D_j}{H}\right) - \left(k\Delta\alpha_{\max} + \sum_{j=k+1}^{i-1} \Delta\gamma_j\right), \quad i > k.$$

Радиальная скорость i -го элементарного рассеивателя относительно гидролокатора при $\alpha_i = 0$ определяется выражением

$$v_{i0} = v \sin\left(k\Delta\alpha_{\max} + \sum_{j=k+1}^i \gamma_j\right), \quad i > k. \quad (16)$$

С учетом выражения (16) радиальная скорость произвольного i -го элементарного рассеивателя относительно гидролокатора определяется формулой

$$v_{\text{rev},i} = v \sin\left(k\Delta\alpha_{\max} + \sum_{j=k+1}^i \gamma_j\right) \cos\alpha_{\text{rev},i}, \quad i > k.$$

Наклонная дальность до i -го элементарного рассеивателя определяется выражением

$$R_{\text{rev},i} = \frac{H}{\cos\left(k\Delta\alpha_{\max} + \sum_{j=k+1}^i \gamma_j\right)}, \quad i > k.$$

Дальнейший расчет сигналов s_i ведется исходя из предположения, что каждый элементарный рассеиватель является источником отраженного сигнала и его математическая модель для зондирующего ГЧМ-сигнала определена выражением (13) с учетом амплитудного затухания, обусловленным обратным рассеиванием. Коэффициент обратного рассеивания поверхности реверберации определяется углом скольжения нормали волнового фронта к поверхности и волнением поверхности моря, либо типом грунта дна. На практике коэффициент обратного рассеивания определяется на основе эмпирических данных.

Аддитивное наложение всех рассеивателей в соответствии с (14) позволяет получить описание полного сигнала реверберации.

Варьирование параметров $\Delta\alpha_{\max}$ и ΔD_{\max} позволяет учитывать вычислительную нагрузку системы моделирования, обеспечивая приемлемую точность модели.

5. Результаты имитационного моделирования

Имитационное моделирование гидроакустической обстановки проводилось для точечного отражателя в поверхностном море глубокого моря (без учета донной реверберации [9]) для совмещенной посылки тонального и ГЧМ-импульса.

В реальной гидроакустической обстановке невозможно наблюдать отдельные элементарные гидроакустические сигналы в чистом виде. Значительные искажения вносят помехи, тем не менее для наглядности иллюстраций результатов моделирования при расчетах намерено улучшено соотношение сигнал-шум сигнала (рис. 7, 8).

Визуальное сравнение графиков сигналов, полученных в результате имитационного и натурного экспериментов, не дает количественной оценки сопоставимости результатов, поэтому адекватность полученной модели оценивалась сравнением результатов адаптивной пространственно-временной и спектральной обработки сигналов [10, 11] гидролокационным комплексом в режиме реального времени (рис. 9).

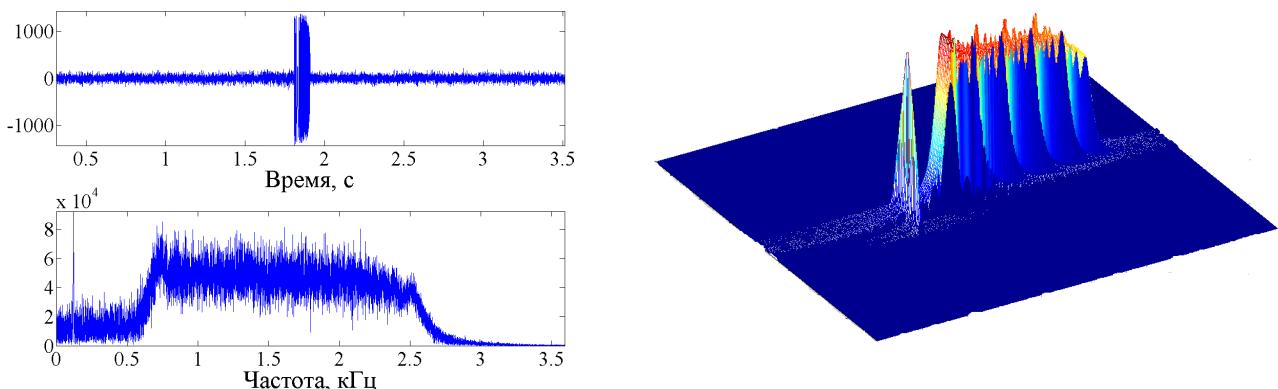


Рис. 7. Результаты моделирования совмещенной зондирующей посылки тонального и гиперболического частотно-модулируемого сигнала без учета реверберации

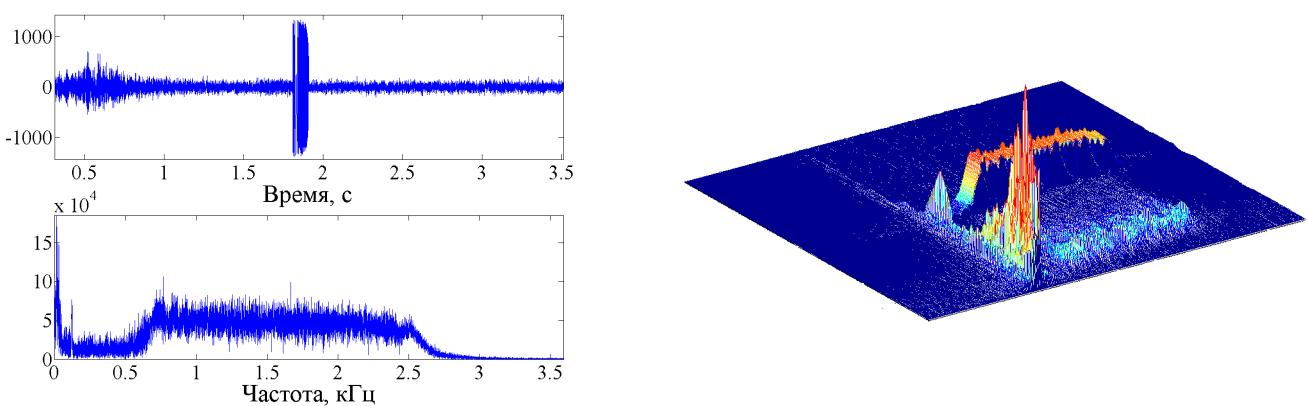


Рис. 8. Результаты моделирования совмещенной зондирующей посылки тонального и гиперболического частотно-модулируемого сигнала с учетом реверберации

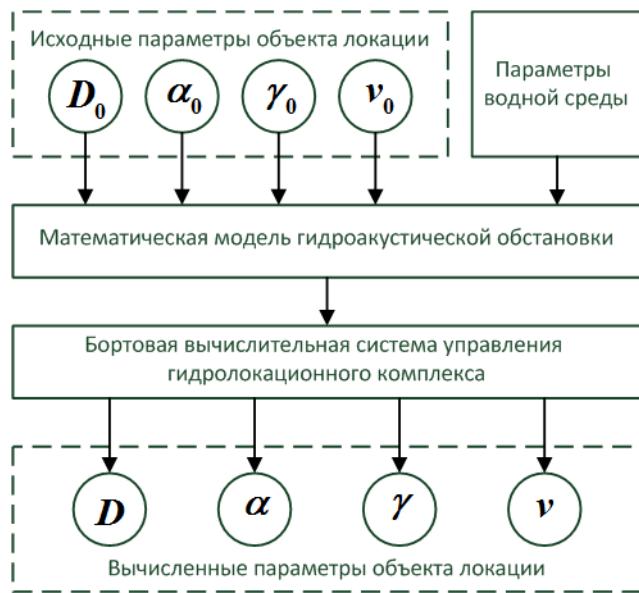


Рис. 9. Функциональная схема валидации математической модели гидроакустической обстановки

Пусть все параметры объекта локации: дальность D , азимут α , угол места γ , скорость v являются элементами вектора \vec{L} , тогда приведенная погрешность i -го элемента вектора δ_i определяется выражением

$$\delta_i = \frac{L_i - L_{i0}}{L_{i,\max}},$$

где L_i — величина i -го параметра, полученная в результате алгоритмической обработки моделюемых гидроакустических данных; L_{i0} — номинальная исходная величина i -го параметра; $L_{i,\max}$ — максимально возможная допустимая величина i -го параметра.

Функции плотностей распределения вероятностей отклонений параметров объекта локации приведены на рис. 10.

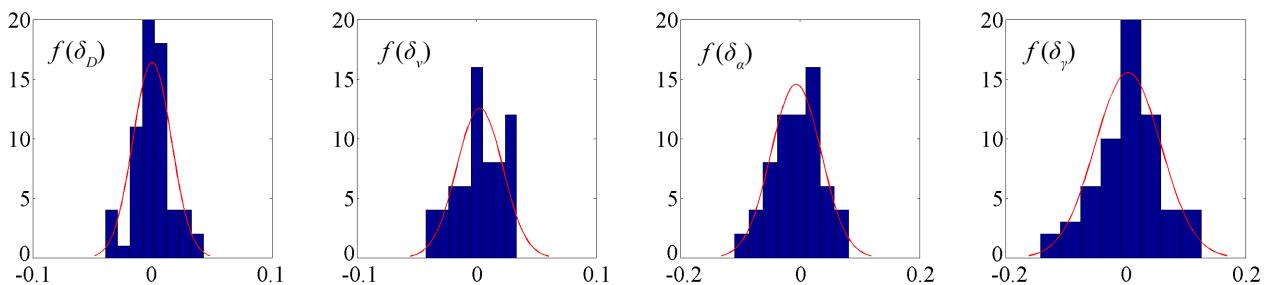


Рис. 10. Графики функций плотности распределения приведенных погрешностей параметров объекта локации

Полагая, что алгоритм обработки гидролокационных данных является верным и не подлежит коррекции при оценке адекватности имитации сигналов, условием успешной валидации математической модели гидроакустической обстановки является одновременное выполнение

ние неравенств

$$\int_{-\delta_{D0}}^{\delta_{D0}} f_D(\delta_D) d\delta_D \geq P_D, \quad \int_{-\delta_{v0}}^{\delta_{v0}} f_v(\delta_v) d\delta_v \geq P_v, \quad \int_{-\delta_{\alpha0}}^{\delta_{\alpha0}} f_\alpha(\delta_\alpha) d\delta_\alpha \geq P_\alpha, \quad \int_{-\delta_{\gamma0}}^{\delta_{\gamma0}} f_\gamma(\delta_\gamma) d\delta_\gamma \geq P_\gamma,$$

где P_D , P_α , P_γ , P_v — заданные пороговые вероятности определения дальности, азимута, угла места и скорости объекта локации соответственно.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана математическая модель гидроакустической обстановки в точке приемного устройства в виде цифрового комплексного сигнала на промежуточной частоте и проведены имитационные эксперименты по формированию и обработке полученного сигнала. Результаты работы использованы в рамках выполнения опытно-конструкторской работы по договору № И070106 НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана при разработке алгоритмического и программного обеспечения гидролокационного комплекса.

Основным преимуществом полученной модели является снижение вычислительной нагрузки на аппаратуру системы моделирования в $f_0/(2f_i)$ раз за счет формирования сигнала на промежуточной частоте f_i по сравнению с прямым формированием сигнала на несущей частоте f_0 [6]. Суммарный объем необходимых вычислений также может быть снижен за счет параметрического управления точностью модели. Полученные результаты имеют наибольшее значение при обеспечении адекватности моделирования сигналов гидролокационных комплексов реального времени.

Среди направлений перспективных исследований для решения поставленной задачи авторы рассматривают анализ методов и алгоритмов канонического и спектрального описания дискретных псевдослучайных сигналов в базисе Виленкина — Крестенсона [12, 13] и варианты их применения с целью расширения номенклатуры формируемых элементарных гидроакустических сигналов, оптимизации времени их вычисления и точности модели.

Список литературы

1. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. 2-е изд. Л.: Судостроение, 1983. 280 с.
2. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с. [Urick R.J. Principles of underwater sound. N.Y.; L.: McGraw-Hill, 1975].
3. Etter P.C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. 3rd ed. N.Y.: CRC Press, 2003. 424 p.
4. Гладков В.В., Корнеев Ю.А. Применение имитационного моделирования для отладки алгоритмов обработки гидролокационной информации // Вестник Рязанского гос. радиотехнического университета. 2009. № 3(29). С. 40–48.

5. Скрипник А.Г. Имитатор полей сигналов и помех на выходе приемных элементов гидроакустической антенны в цифровом виде и программный комплекс расчета зон обнаружения: дис. . . . канд. техн. наук. М., 2004.
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. Электрон. журн. 2013. № 2. С. 301–310. DOI: [10.7463/0213.0531784](https://doi.org/10.7463/0213.0531784)
7. 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. Электрон. журн. 2013. № 6. С. 351–364. DOI: [10.7463/0613.0570096](https://doi.org/10.7463/0613.0570096)
8. Сотников А.А., Якупов Ш.З. Методика автономного функционального контроля технического состояния вычислительных систем гидролокационных комплексов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. С. 244–266. DOI: [10.7463/1014.0729325](https://doi.org/10.7463/1014.0729325)
9. Стромков А.А., Лучинин А.Г., Хилько А.И. Исследование низкочастотной донной reverberации в мелком море // Акустический журнал. 2008. Т. 54, № 4. С. 589–598.
10. Сотников А.А. Использование программируемой логической БИС для реализации адаптивной обработки широкополосных гидроакустических сигналов // 8-я Междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»: ГА-2006 (С.-Петербург, Россия, 29-31 мая 2006 г.): труды. Приложение к сб. «Гидроакустика». С. 428–432.
11. Waite A.D. Sonar for Practising Engineers. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2002. 298 p.
12. Сюзев 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. Электрон. журн. 2016. № 10. С. 102–116. DOI: [10.7463/1016.0848907](https://doi.org/10.7463/1016.0848907)
13. Сюзев В.В. Основы теории цифровой обработки сигналов: Учеб. пособие. М.: РТСофт, 2014. 752 с.

Intermediate Frequency Hydro-acoustic Signal Simulation

Rozanov I. A.¹, Sotnikov A. A.^{1,*}

*sotnikov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Russia

Keywords: mathematical model, sonar complex, computer performance, simulation modeling, sonar ambiance, intermediate frequency

HIL-modeling is an efficient tool to improve mathematical and algorithmic support and software of sonar complexes at the stages of laboratory and pre-factory tests. In real time simulation a balance has to be struck between the approximation of the physical process and the computer performance of the system that is used for modeling.

The authors have offered a modeling method of hydro-acoustic signals at the point of receiver of a sonar complex system at heterodyne frequency and developed a mathematical model of the most typical signals in the field of active sonar. The model differs from the known ones by the lower requirements for computer performance, which is necessary to improve the accuracy and to ensure the adequacy of the model and signal samples in real time. The offered model is generic and can be extended. Thus, it can be adapted for solving the specific tasks taking into consideration a set of the article's assumptions and restrictions formulated regarding the proposed modeling method.

A real-world application of the model expects not only software development and enhancement, but also operation supervision of on-board control systems of the sonar complexes during acceptance tests at the factory. An agile mechanism to control the parameters of a location and water medium object enables providing complete test coverage of all the states of the system to be controlled.

The experiments in processing of received signals based on the on-board control system of the sonar complex have been implemented within the framework of a number of the research and development activities conducted by the Research Institute of Informatics and Control Systems at Bauman Moscow State University.

Authors' further research is to be aimed at model development via enhancing the set of elementary sonar signals generated, as well as at optimizing their computation time and increasing the model accuracy.

References

1. Olshevskij V.V. *Statisticheskie metody v gidrolokatsii* [Statistical methods in sonar]. 2nd ed. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 280 p. (in Russian).
2. Urick R.J. *Principles of underwater sound*. N.Y., L., McGraw-Hill, 1975. (Russ. ed.: Urick R.J. *Osnovy gidroakustiki*. L.: Sudostroenie Publ., 1978. 445 p.).
3. Etter P.C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. 3rd ed. N.Y., CRC Press, 2003. 424 p.
4. Gladkov V.V., Korneev Yu.A. The use of simulation for debugging of algorithms for processing sonar information. *Vestnik of the Ryazan State Radioengineering Univ.*, 2009, no. 3(29), pp. 40–48 (in Russian).
5. Skripnik A.G. *Imitator polej signalov i pomekh na vykhode priemnykh elementov gidroakusticheskoy antenny v tsifrovom vide i programmnyj kompleks rascheta zon obnaruzheniya*. Kand. diss. [Simulator the fields of signals and noise at the output of the reception hydroacoustic antenna elements in digital form and the software for calculations of detection zones. Cand. diss.]. Moscow, 2004 (in Russian).
6. Sotnikov A.A. Method of improving efficiency of digital simulation systems for modeling a real time hydro-acoustic situation. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 2, pp. 301–310. DOI: [10.7463/0213.0531784](https://doi.org/10.7463/0213.0531784)
7. Sotnikov A.A., Yakupov Sh.Z., Romanovskij A.S. Controlling computing systems of sonar complexes with the use of simulation modeling. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 6, pp. 351–364. DOI: [10.7463/0613.0570096](https://doi.org/10.7463/0613.0570096)
8. Sotnikov A.A., Yakupov Sh.Z. The method of a standalone functional verifying operability of sonar control systems. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2014, no. 10, pp. 244–266. DOI: [10.7463/1014.0729325](https://doi.org/10.7463/1014.0729325)
9. Stromkov A.A., Luchinin A.G., Khil'ko A.I. Low-frequency bottom reverberation in shallow water. *Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, no. 4, pp. 508–517. DOI: [10.1134/S1063771008040118](https://doi.org/10.1134/S1063771008040118)
10. Sotnikov A.A. Ispol'zovanie programmiremoj logicheskoy BIS dlja realizatsii adaptivnoj obrabotki shirokopолосnykh hidroakusticheskikh signalov [The use of programmable logic BIS to implement adaptive processing of wideband sonar signals]. 8 Mezhdunarodnaja konferentsiya “Prikladnye tekhnologii hidroakustiki i hidrofiziki” (GA-2006) [8th Intern. Conf. on Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics]: proc. St. Petersburg, 2006, pp. 428–432 (in Russian).

11. Waite A.D. Sonar for Practising Engineers. 3rd ed. Chichester, Wiley, 2002. 298 p.
12. Syuzev V.V., Gurenko V.V. Description and simulation of pseudo-random signals in the framework of the generalized correlation theory in single-base numerical systems. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2016, no. 10, pp. 102–116. DOI: [10.7463/1016.0848907](https://doi.org/10.7463/1016.0848907)
13. Syuzev V.V. *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki signalov* [Basic theory of digital signal processing]. Moscow, RT SOFT Publ., 2014. 749 p. (in Russian).