

## ПОДХОД К ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОГО ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В.В. Прокопович, А.В. Шафранюк (Санкт-Петербург)

### Введение

Гидроакустическая станция (ГАС) является сложной системой, основной задачей которой является обнаружение и определение координат и параметров движения морских шумящих объектов. Для решения этих задач в состав ГАС входят фазированные антенные решетки (ФАР) с сотнями, а иногда и тысячами датчиков акустического давления. Сигналы с выходов приёмных каналов ФАР в ГАС обрабатываются иерархически на нескольких уровнях. На рис. 1 представлен пример классической структуры обработки информации.

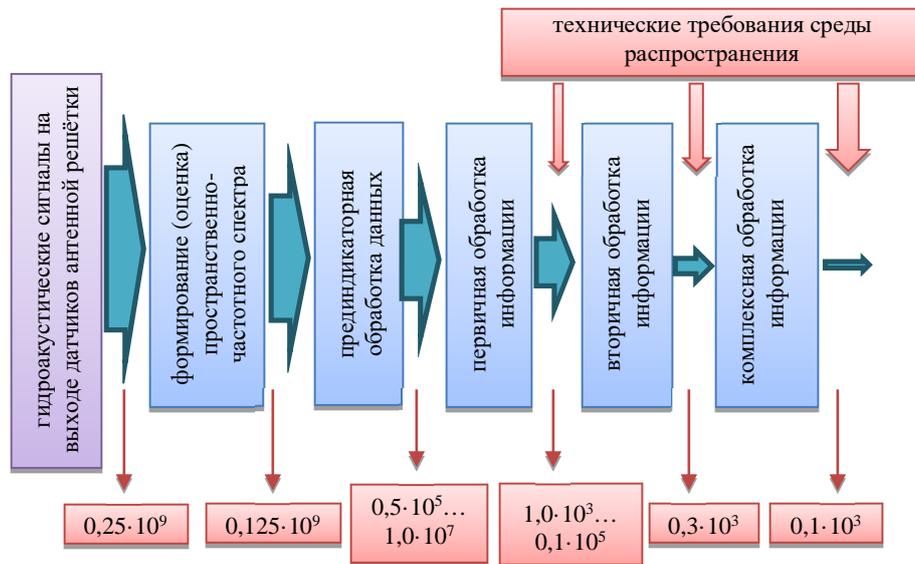


Рис. 1. Структуры многоуровневой обработки информации в гидроакустических системах.

На рис. 1 числовыми значениями указан порядок потока данных Бит/с на выходе соответствующего уровня обработки данных в ГАС.

Для сокращения затрат на создание ГАС на различных этапах разработки широко применяется формирование входных тестовых данных для каждого из уровней обработки данных. Формирование тестовых данных осуществляется программными имитационными моделями (ПИМ) [1].

При этом качество обработки алгоритмов и штатного программного обеспечения (ПО) ГАС напрямую зависит от качества используемых в ПИМ моделей. На настоящий момент в технических заданиях (ТЗ) на разработку имитационных моделей в гидроакустике практически отсутствуют объективные критерии. Чаще используется весьма расплывчатый термин «адекватность», либо проверяются частные параметры формируемых имитационных данных. При этом предъявлять объективные параметры для имитационных моделей нижних уровней обработки информации в ГАС затруднительно в силу огромных объёмов информации (см. рис. 1).

Для оценки качества модели корректнее применять достаточно широкое понятие квалиметрия моделей. В рамках этого понятия оценивается большое количество свойств модели [2, 3], таких как адекватность, оптимальность, гибкость, универсальность, унификация, идентифицируемость, развиваемость и т.д.

Оценка адекватности классическим методом сравнения непосредственно выходных данных модели с выходными данными объекта-оригинала затруднительно

(или вовсе невозможна) по целому ряду причин. Так, для моделей нижнего уровня для получения таких данных требуется дополнительная обработка имитационных результатов, а для имитаторов верхнего уровня требуется обеспечивать стохастические параметры имитируемых данных, реальное распределение которых для конкретной системы на этапе её создания неизвестно. В связи с этим проверка адекватности сводится либо к экспертной оценке непосредственно результатов моделирования, либо выполнению точечных проверок для контроля нескольких частных параметров.

Целью данной работы является раскрытие понятия адекватности применительно к ПИМ ГАС и разработка методики оценки адекватности, с примером её применения для декларативных моделей верхних уровней обработки информации в ГАС, разработанных авторами.

#### **Определение понятия адекватности**

Для оценки адекватности предлагается использовать такие свойства как полезность и точность модели. При этом под полезностью предлагается понимать обеспечение необходимым для использования набором моделируемых параметров, а также соблюдение временной диаграммы по их выдаче и сохранения логики работы.

О точности же модели будем судить о возможности её переносимости. Под переносимостью будем понимать такое свойство модели, при котором штатное программно-алгоритмическое обеспечение ГАС, отработанное на выработанных моделью тестовых данных, без существенных изменений будет аналогичным образом функционировать с использованием натуральных данных. Таким образом, определяется соответствие ПИМ её прямому назначению – обеспечению отработки штатного ПО ГАС. В свою очередь, ГАС ограничивается требованиями, предъявляемыми к параметрам, вырабатываемым блоками ПО высокого уровня (как правило, ВОИ). К таковым можно отнести:

- вероятность правильной классификации;
- точность пеленгации;
- дальность действия и т.п.

В соответствии с написанным точной будет являться ПИМ, тестовые данные которой для некоторого уровня обработки данных в ГАС дадут выходные данные верхнего уровня обработки информации в ГАС стохастически близкие к полученным на основе натуральных данных.

При реализации такого подхода существует некоторая сложность реализации, связанная с отсутствием ГАС, находящегося в разработке. В этом случае можно воспользоваться уже существующим ГАС, проверив адекватность ПИМ с их использованием, и решить задачу двумя способами:

- при наличии существующей ГАС и соответствующих натуральных данных использовать их в качестве референсных. Однако такой подход имеет два основных недостатка: ограниченность натуральных записей по акваториям и требуемым уровням обработки сигналов и тактическим ситуациям и, как правило, отсутствие полноценных стендов, что потребует некоторого компромисса;

- при наличии штатного ПО существующих ГАС от уровня прединдикаторной обработки, путём его развёртывания на универсальных вычислителях. Возможность такого подхода встречается гораздо чаще; в этом случае в качестве референсных данных используется имитатор приёмных каналов ФАР.

Основные подходы приведены схематично на рис. 2 в порядке возрастания адекватности слева направо.

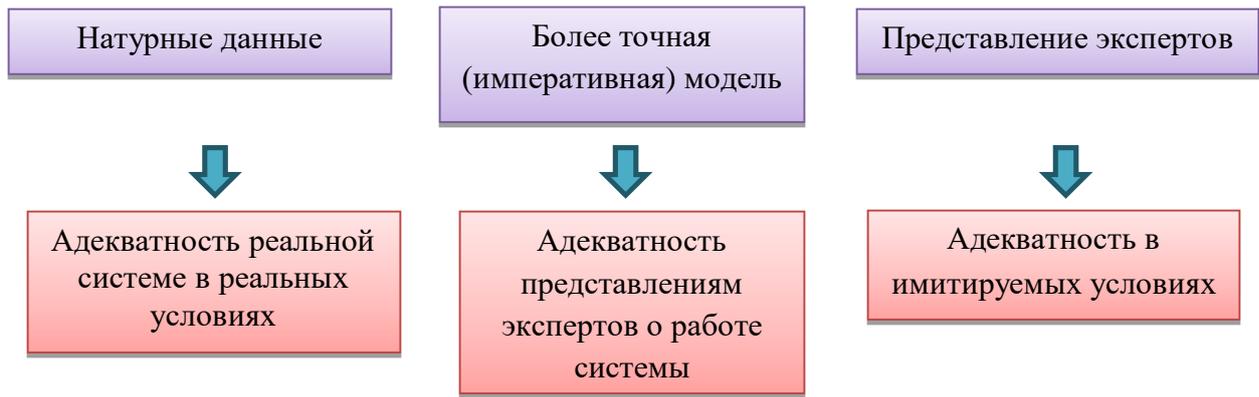


Рис. 2. Подходы к проверки адекватности ПИМ

Таким образом, провести оценку адекватности возможно и в отсутствии натуральных данных, однако следует четко формулировать адекватность чему и в каких условиях оценивается. При этом отметим, что как показывает практика, адекватности в имитируемых условиях достаточно для решения широкого круга задач по отработке штатного ПО ГАС с сохранением переносимости результатов в случае работы в реальных условиях.

После выбора реализации методики проверки на адекватность встает вопрос о выработке численных критериев оценки адекватности. Как отмечалось выше, традиционно используется технологическое ПО, которое по смоделированным данным оценивает ограниченный перечень параметров, по которым принимается решение об адекватности ПИМ.

При разработке подхода к оценке адекватности авторами за основу был взят тезис, что модель считается адекватной, если штатное ПО и алгоритмы использующие результаты моделирования реагируют на смоделированные данные аналогично реакции на натурные или более «точные» данные императивных имитаторов ГАС более низкого уровня. Таким образом, наибольший интерес представляет не столько адекватность непосредственно самих модельных данных, сколько реакция всего комплекса на эти данные. В качестве параметров такой реакции выступают выходные данные верхних уровней обработки штатного ПО, нормируемые ТЗ на ГАС.

Определившись с перечнем параметров и источником референсных выборок, встает вопрос об используемом математическом аппарате для сравнения референсных и модельных данных. Традиционно диапазон или МО и СКО для выполнения нормы определялись экспертами на основе опыта и результатов прогнозных расчетов. В рассматриваемом же подходе предлагается сравнение непосредственно двух выборок по каждому из параметров, вырабатываемых оцениваемой моделью и референсной (более точной). В рамках подхода предлагается проведение проверки принадлежности выборок к одному закону распределения [4].

#### **Пример проверки адекватности ПИМ**

Рассмотрим в качестве примера проверку адекватности имитатора прединдикаторной обработки данных в ГАС, разработанной авторами в ходе своих исследований [5].

Декларативная модель прединдикаторной обработки строится с использованием упрощенного представления сигнальных откликов, что неизбежно сказывается на работе всего штатного ПО ГАС, в т.ч. на обнаружении ложных отметок штатным ПО на уровне ПОИ. При этом в ПИМ искусственно была внесена некорректная выработка значений индикаторного ОСП и уровня сигнала – для более наглядной демонстрации несоответствия ПИМ по этим параметрам.

Схема для получения референсной и модельной выборок приведена на рис. 3.

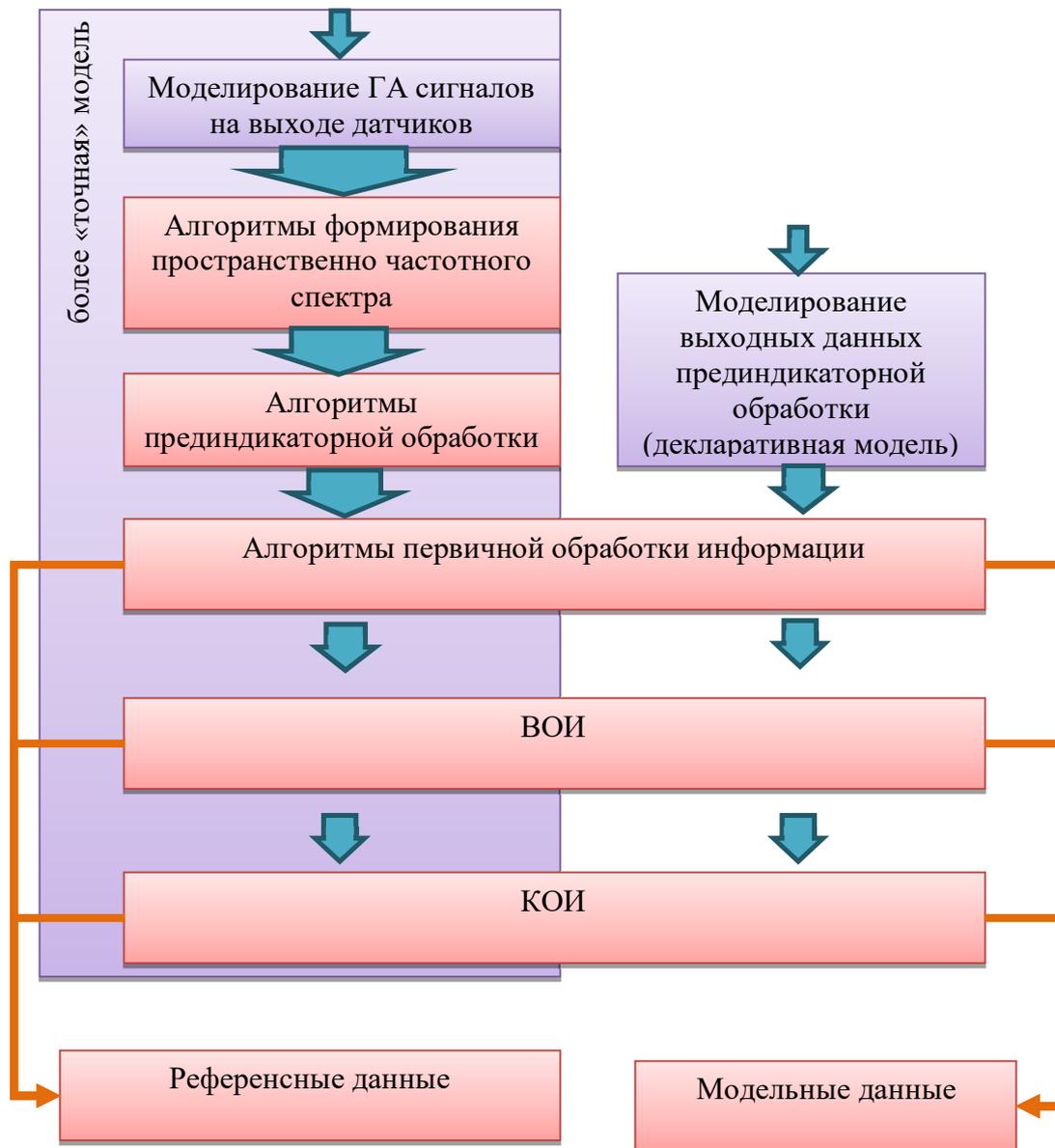


Рис. 3. Схема получения референсных и модельных данных

В рассматриваемом случае референсные данные получают на основе данных императивного ПИМ приёмных каналов ФАР, разработанной авторами и алгоритмов первичной (ПОИ), вторичной (ВОИ) и комплексной (КОИ) обработки информации схожих со штатными. Отметим, что в обоих случаях использовались одни и те же модели распространения звука в среде, модель движения объектов и шумоизлучения, что исключает их влияние на оценку адекватности непосредственно модели функционирования.

Отметим, что в отличие от оцениваемой модели у референсой нет требований к быстродействию или временной диаграмме. Получение референсных выборок по оцениваемым параметрам возможно проводить в камеральном режиме.

Оценивается следующий перечень параметров: индикаторное отношение сигнал/помеха ( $I$ ), уровень сигнала ( $L$ ), оценка пеленга ( $\alpha$ ), СКО оценки пеленга ( $d\alpha$ ), оценка угла места ( $\beta$ ) и СКО ( $d\beta$ ), акустическая протяженность ( $A$ ), величина изменения сигнала ( $\Delta I$ ) и величина изменения пеленга ( $\Delta\alpha$ ) и их СКО ( $d\Delta\alpha$ ).

Перед проведением проверки на однородность законов распределения потребовалось подготовить данные, а именно, выделить отметки, трассы и формуляры, соответствующие имитируемой цели, а также сгруппировать ложные отметки по секторам по 30 градусов. Результаты оценки адекватности представлены в таблице 1 в виде вероятности равенства в стохастическом смысле данных референсной модели и оцениваемой.

Таблица 1. Результаты проверки адекватности

Уровень обработки	I	L	$\alpha$	d $\alpha$	$\beta$	d $\beta$	A	$\Delta I$	d $\Delta I$	$\Delta \alpha$	d $\Delta \alpha$
ПОИ по целям	0	0	0.8	0.54	0.3	0.65	0.5	–	–	–	–
ВОИ	0	0	0.9	0.6	0.5	0.7	0.6	0	0	0.93	1
КОИ	0		0.9	0.6	0.5	0.7	–	–	–	1	1
ПОИ по ложным отметкам	0.83	0.83	–	0.85	–	0.86	0.88	–	–	–	–

В общем случае решение об адекватности ПИМ может быть принято при превышении вероятности однородности стохастических выборок по каждому контролируемому параметру над заданным порогом (обычно порядка 0,4). Отметим, что оценка адекватности по предлагаемой методике также позволяет оценить возможность применения ПИМ для решения узкой задачи, например, пеленгации. В этом случае имеет смысл требовать адекватности только от пеленгационных параметров, например, курсового угла отметки. Так, на представленном примере, несмотря на некорректную имитацию индикаторного ОСП и уровня сигнала, ПИМ может применяться для отработки алгоритмов траекторного анализа в части фильтрации ложных отметок.

### Заключение

Рассмотренный в докладе подход позволяет формировать в ТЗ объективные числовые требования на имитационное ПО, ПО учебно-тренировочных режимов и тренажёров в части адекватности. Помимо выставления требований и проверки достижения разрабатываемыми ПИМ целевых показателей, методика позволяет осуществлять селекцию ПИМ по различным признакам, выбирая, например, более производительные ПИМ в ущерб адекватности по не критичным параметрам.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253)*

### Литература

1. **Шафранюк А.В.** Опыт отработки гидроакустического комплекса на стенде сопровождения изделия // В сборнике: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. Труды XV Всероссийской конференции, 2020. С. 511-514.
2. **Беляева В.В., Грановский В.А., Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Способы оценки уровня адекватности имитационного программно-алгоритмического обеспечения // В сборнике: Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018). Материалы 7 Международной научно-технической конференции, 2018. С. 180-186.

3. **Беляева В.В., Горбунов Е.А., Грановский В.А., Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Результаты метрологической аттестации программно-аппаратного имитационного комплекса стенда отладки и моделирования программного обеспечения // В сборнике: Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018). Материалы 7 Международной научно-технической конференции, 2018. С. 65-69.
4. **Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В.** О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестник Томского Государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2017. С. 24-31.
5. **Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Разработка имитаторов входных данных первичной обработки информации в гидроакустических комплексах // В сборнике: Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 2018. С. 585-588.