



УДК 621.391

Е. Л. Шейнман, А. Н. Афанасьев
АО «Концерн „Океанприбор“»

М. С. Куприянов, Д. М. Клионский, С. Н. Ежов, С. Е. Половцев, А. М. Голубков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Имитатор входных гидроакустических сигналов интегрированной системы подводного наблюдения

Разработан имитатор входных сигналов для интеграции в гидроакустические средства подводного наблюдения. Рассмотрены алгоритмы моделирования шумоизлучения морских объектов прямых и отраженных активных гидролокационных сигналов с учетом распространения в стратифицированной морской среде. Приведены примеры расчета входных сигналов в режиме обнаружения гидроакустических комплексов. Описана программная реализация имитатора на языке C++ в среде программирования Qt Creator с представлением диаграммы классов и диаграммы вариантов использования. В рамках расчетов рассмотрено влияние эффекта Доплера. Также изучено формирование спектров активных сигналов в режиме обнаружения гидроакустических средств. Описано взаимодействие имитатора с внешним модулем – системой гидрологических расчетов – для получения информации о гидрологии морской среды. Для постановки задачи эксперимента, отображения режимов шумопеленгования, гидролокации и обнаружения гидроакустических средств описан интерфейс, реализованный на QML.

Гидроакустический сигнал, имитатор модели сигналов, активный сигнал, сигнал шумоизлучения, средства подводного наблюдения

Статья посвящена разработке имитатора входных сигналов для интеграции в гидроакустические средства подводного наблюдения [1], [2], находящиеся в выбранной акватории и решающие задачу освещения подводной обстановки в районе. Имитируется движение ряда морских объектов, участвующих в тактическом эпизоде, часть морских объектов имеет на борту гидроакустическое вооружение (L объектов), а следовательно, и антенны, часть морских объектов не имеет гидроакустического вооружения на борту (K объектов). Антенны могут поддерживать один или более режимов работы. Рассматриваются режимы шумопеленгования, гидролокации и обнаружения гидролокационных сигналов.

Основная информация о гидрологии морской среды и параметрах излученных активных сигналов, параметрах гидроакустических средств подводного наблюдения, параметрах шумоизлучения

объектов и их отражательной способности берется из баз данных, а также сторонних программных систем. Это позволяет разработать унифицированное программное обеспечение, позволяющее имитировать входные сигналы для различных средств наблюдения.

Разработанный сигнальный имитатор представляет собой сложную программную систему, реализованную в среде программирования Qt Creator на языке C++ (прототип реализован в программной системе MATLAB) и QML (реализация интерфейса СОРДиУ – системы отображения, регистрации, документирования и управления), взаимодействующую с другими программными системами и базой данных, содержащей информацию об объектах в морской акватории.

Разработанный сигнальный имитатор может применяться в качестве входной модели для отработки и отладки алгоритмического обеспечения

гидроакустических комплексов (ГАК) и интегрированных систем подводного наблюдения (ИСПН), в том числе построенных на сетцентрическом принципе.

Имитатор решает следующие задачи:

- моделирование и визуализация (во временной и частотной областях) излучаемых активных гидроакустических сигналов и отраженных на излучающих антеннах сигналов для исследования режима гидролокации (ГЛ) и режима обнаружения гидролокационных станций (ОГС);

- моделирование и визуализация (во временной и частотной областях) сигналов пассивного шумоизлучения морских объектов (для исследования режима шумопеленгования – ШП);

- моделирование распространения гидроакустических сигналов в морской среде и визуализация характеристик акустического поля (во временной и частотной областях);

- моделирование и визуализация помех морской акватории;

- вычисление и визуализация (во временной и частотной областях) сигналов в точках приема с учетом среды распространения (для исследования режимов ГЛ, ШП и ОГС).

Чтобы решить эти задачи, задают частоту дискретизации для расчета частотных сеток сигнала в точках излучения и приема, а также расчета частотных характеристик акустического поля; размерность дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для вычисления спектра сигналов; эквивалентные радиусы объектов в морской акватории для определения уровней отраженного сигнала.

Предусматривается сохранение промежуточных и окончательных результатов моделирования и расчетов для дальнейшего использования.

Расчет эффекта Доплера. В рамках разработки сигнального имитатора осуществляется коррективировка сигнала с учетом доплеровского сдвига частоты имитируемого эхосигнала на входе приемной антенны в режиме бистатической гидролокации (режим бистатики). Данный режим подразумевает, что излучатель, цель и приемник разнесены друг от друга в пространстве. Рассчитанная частота эхосигнала передается в режим ГЛ.

Реализация расчета активных сигналов во временной области. Алгоритмы формирования сигналов в имитаторе. Сигнал формируется в точке излучения и в точке приема для каждого импульса, для полной посылки и серии посылок с

учетом интервалов времени между импульсами и с учетом интервалов времени между посылками.

Одиночный сигнал формируется с использованием частотно-временной структуры (ЧВС).

1. *Тональный (гармонический) сигнал* [3], [4]

$$s(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t),$$

где A_0 – амплитуда излучения; f_0 – частота излучения, Гц. Сигнал имитируется при постоянном значении частоты F_i , поступающем в течение интервала времени, равного длительности импульса $t_{\text{имп}}$, с шагом dt , темпом поступления информации (периодом дискретизации).

На интервале времени между импульсами значение частоты полагают равным нулю.

2. *ГЧМ-сигнал.*

Сигналы формируются в соответствии с формулами:

– прямая модуляция:

$$S(t) = A_0 \cos[-2\pi F_H \ln(1 - bt)/b],$$

где F_H – нижняя граничная частота; $b = \Delta F / (\tau F_B)$; ΔF – девиация частоты; F_B – верхняя граничная частота ($F_B = F_H + \Delta F$); τ – коэффициент;

– обратная модуляция:

$$S(t) = A_0 \cos[-2\pi F_B \ln(1 + b't)/b'].$$

Здесь $b' = \Delta F / (\tau F_H)$.

3. *Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнал)* [3], [4].

Несущая частота ЛЧМ-сигнала изменяется в пределах длительности импульса линейно со скоростью, равной $dF_{\text{имп}}$. Частота импульса в i -й момент времени

$$F_{i\text{и}} = F_{\text{нач}} + dF_{\text{имп}} i dt,$$

где $F_{i\text{и}}$ – частота импульса в i -й момент времени; $F_{\text{нач}}$ – начальная частота импульса.

Кроме того, для задачи имитации входных воздействий в имитаторе предусмотрены 2 режима работы:

- имитация по алгоритмам, приведенным выше;

- имитация сигнала с учетом случайных воздействий.

Во втором случае в каждый момент времени к восстановленному значению частоты, после учета доплеровского сдвига, с помощью нормально распределенного датчика случайных чисел добавляется случайная составляющая $N(0, \sigma^2)$, где σ – среднеквадратическое отклонение случайной составляющей.

В гидролокации сигналы обычно излучаются пачками, которые имеют следующие параметры: N – число импульсов в пачке; tk – период следования импульсов в пачке (в секундах); T – период следования пачек (в секундах); $\tau_{\text{и}}$ – длительность одиночного импульса в пачке (в секундах).

Формирование спектра активного сигнала в режиме ОГС. При имитации излучения сигнала из объекта рассчитывается отношение сигнал/помеха (ОСП) на входе приемной антенны на всех объектах из состава маневренной составляющей в момент прихода сигнала на объекты. ОСП рассчитывается как отношение суммы спектральных плотностей мощности (СПМ) всех лучей на средней частоте сигнала к СПМ помехи на той же частоте.

Исходя из средней частоты излученного сигнала $F_{\text{ср}}$ вычисляется диапазон тракта обнаружения гидроакустических сигналов (ОГС) и формируется СПМ излученного сигнала в точке приема ОГС. Для получения параметров сигнала в точке приема в системе гидрологических расчетов (СГР) формируется запрос на расчет поля в соответствующем диапазоне частот. Если для диапазона 1 (1...10 кГц) достаточно расчета СГР для ШП и ГЛ, то для диапазонов 2 (10...30 кГц) и 3 (30...60 кГц) необходим новый расчет. Рассчитанные СПМ сигнала выдаются в ОГС с темпом в 1 с и сопровождаются пеленгом на объект, излучивший сигнал, номером диапазона и кодом сигнала в базу данных.

Сигнал в точке приема для ОГС определяется суммированием сигналов по лучам с учетом времен пролета по лучу. СПМ сигнала ОГС формируется в соответствии с длительностью излученного сигнала и суммируется в каждом временном интервале расчета (1 с).

Интеграция с внешним модулем СГР. Для получения информации о гидрологии морской среды совместно с имитатором применяется

внешний модуль «Система гидрологических расчетов». Обмен данными производится согласно модели «клиент-сервер», где имитатор является клиентом, модуль СГР – сервером, протокол обмена – ТСР. После включения сервер (СГР) открывает прослушивающий ТСР сокет и переходит в режим ожидания подключения со стороны клиента (имитатор). Инициатором обмена является клиент, который отправляет пакет `client_inquiry`, содержащий параметры запроса. В параметрах запроса содержится информация о координатах объекта-источника и объекта-приемника, количестве и варианте сортировки лучей, начальном угле, шаге по углу, числе секторов в вертикальной плоскости, частотах для расчета. После получения данного пакета сервер производит необходимые вычисления и передает результат клиенту пакетом `server_answer`, после чего опять переходит в режим ожидания запроса от клиента. В пакете `server_answer` передается информация о дистанции между объектами, числе использованных и общем количестве лучей, соединяющих излучатель и цель, углах прихода и выхода лучей, времени полета лучей, частотах, фазах лучей в точках приема, коэффициентах передачи среды по мощности без учета сферического расхождения лучей.

СОРДиУ. Для постановки задачи эксперимента, отображения режимов ШП, ГЛ и ОГС предусмотрен интерфейс СОРДиУ, реализованный на QML. Общий вид СОРДиУ подразумевает разделение на две основные зоны: организационно-технические условия (ОТУ) и зону графической информации. В зоне ОТУ оператору имеет возможность взаимодействовать с тремя участниками тактического эксперимента: «Излучатель», «Объект» и «Приемник».

В зоне «Излучатель» оператору предоставляется возможность выбора номера излучающего объекта-участника тактического эксперимента (при этом класс, подкласс и имя объекта заполняются автоматически, согласно выбранному номеру объекта), антенны, режима и подрежима, поддерживаемых выбранной антенной. По выбранным данным оператор имеет возможность посмотреть широту, долготу, глубину, курс и скорость выбранного объекта, а также код и время излучения сигнала, угол наклона в вертикальной плоскости и частоту используемого сигнала.

В зоне «Объект» оператору предоставляется возможность выбора номера объекта-участника тактического эксперимента (может заполняться автоматически при заполненном излучателе или приемнике, при этом класс, подкласс и имя объекта заполняются автоматически, согласно выбранному номеру объекта). По выбранным данным оператор имеет возможность посмотреть широту, долготу, глубину, курс, скорость и эквивалентный радиус выбранного объекта.

В зоне «Приемник» оператору предоставляется возможность выбора номера объекта из числа приемников для выбранного излучателя (может заполняться автоматически в соответствии с выбранным излучателем). Поля «Класс», «Подкласс» и «Имя» заполняются по тому же принципу, что у «Излучателя» антенны, режима и подрежима, поддерживаемых выбранной антенной. По выбранным данным оператор имеет возможность посмотреть широту, долготу, глубину, курс и скорость выбранного объекта, а также код и время излучения сигнала, угол наклона в вертикальной плоскости и частоту используемого сигнала. Оператор также имеет возможность выбрать антенну для просмотра сигнала на графиках и установить режим и подрежим, доступные для выбранной антенны.

Зона графической информации разделяется на 2 столбца «Приемник» и «Излучатель» и меняет вид в зависимости от выбранного режима. При выбранном режиме ШП отображаются графики «Моделируемый сигнал», «ЧВС и амплитудный спектр». При выбранных режимах ГЛ и ОГС отображаются следующие графики: «Временной процесс», «Временной процесс сигнала ГЛС», «ЧВС и амплитудный спектр».

Также при загрузке программы предварительно возникает окно для установки параметров программы для дальнейшей работы. Оператор может установить количество лучей, сортировку лучей по секторам, число секторов, начальный угол, шаг по углу, конечный угол. Также оператор указывает в начале эксперимента, следует ли использовать датчик случайных чисел.

Взаимодействие и связи между имитатором и некоторыми сторонними системами и модулями могут быть описаны на основе диаграммы компонентов (рис. 1).



Рис. 1

Программную реализацию имитатора можно описать с помощью диаграммы классов (рис. 2), показывающей набор классов и связи между ними, а также их кооперации (взаимодействия).

1. Класс *Imitator* предоставляет имитационную модель тактического эксперимента (данная модель включает в себя характеристики объектов-носителей и характеристики излучаемых активных и шумоподобных сигналов), управляет обновлением объектов тактического эксперимента, моделирует распространение прямых звуковых излучений (непосредственно от передающей антенны на объекте-носителе), моделирует распространение отраженных звуковых излучений и управляет формированием сигнальных данных при пересечении объекта и фронта звукового излучения (расчет сигнала на входе приемной антенны).

2. Класс *Transceiver* предоставляет приемопередатчик для обмена данными с диспетчером и внешними системами. По команде диспетчера инициализирует параметры тактического эксперимента для имитатора. Задает рабочий шаг имитационной модели по команде имитатора. При завершении тактического эксперимента инициализирует завершение имитационной модели.

3. Класс *Siginsord* используется для связи класса *Imitator* с графическим интерфейсом пользователя, написанным на QML. Поддерживает разрешение контекста QML, осуществляет инициализацию и обновление данных, передаваемых с имитатора на графический интерфейс.

4. Класс *Object* предоставляет сущность морского объекта, моделирует шумоизлучение объекта, зависит от параметров шумоизлучения и скорости объекта, определяет настройки антенн, расположенных на борту.

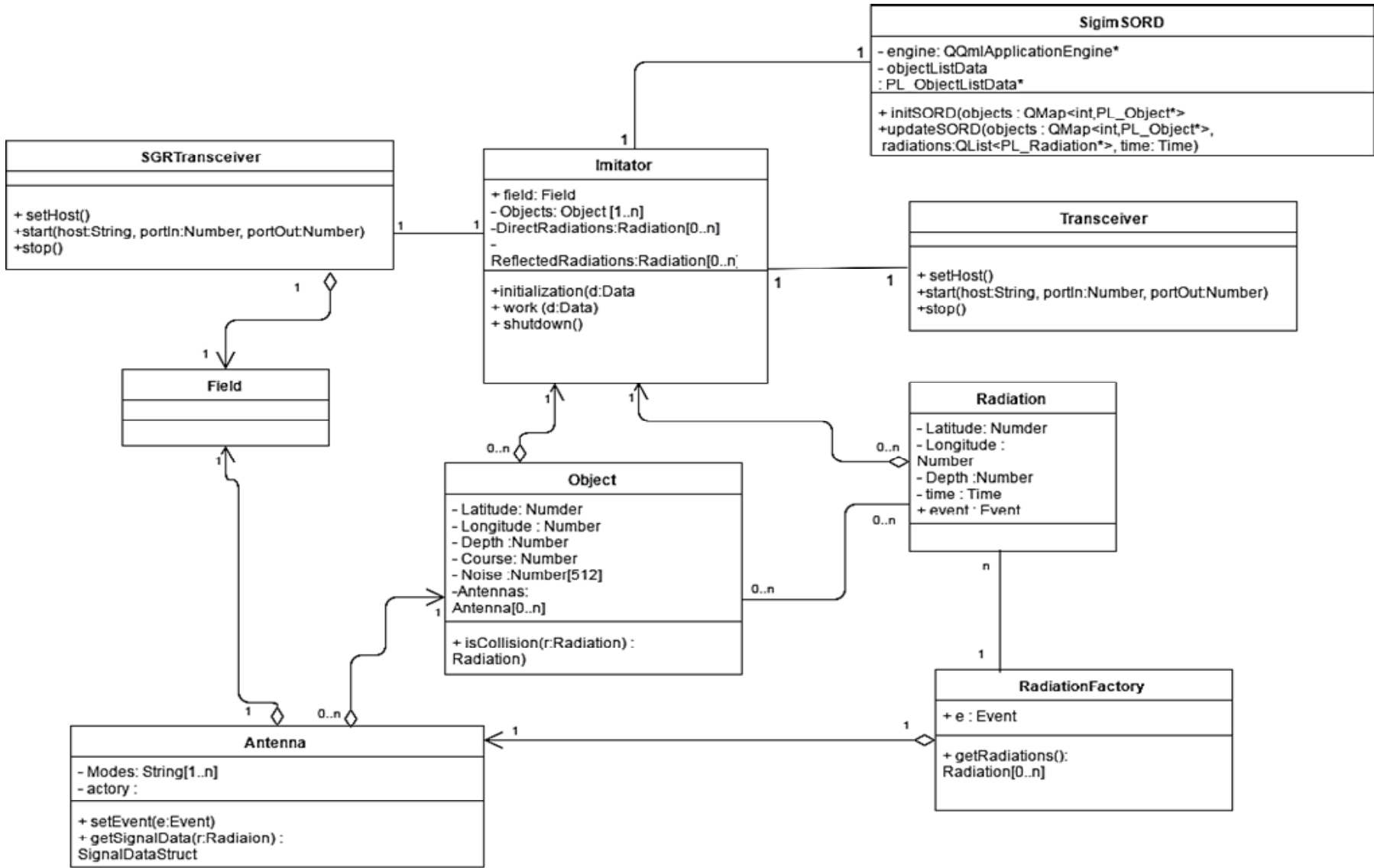


Рис. 2

5. Класс *Antenna* предоставляет сущность антенны гидроакустического вооружения, определяет поддерживаемые режимы и формирует приемные сигнальные данные. Агрегирует экземпляр класса *RadiationFactory* для задания конфигурации излучения антенны.

6. Класс *Radiation* предоставляет сущность излучения активного сигнала, определяет время и позицию излучения.

7. Класс *SGRTransceiver* предоставляет приемопередатчик для обмена данными с диспетчером и системой гидрологических отсчетов. Передает и принимает данные для расчета акустического поля между двумя любыми объектами тактического эксперимента.

8. Класс *Field* предоставляет сущность акустического поля, преобразует данные, полученные от модуля СГР через *SGRTransceiver*, и преобразует их в структуры, удобные для обработки в имитаторе.

Представленный имитатор позволяет осуществлять моделирование и расчет сигналов в точках излучения и приема и может использоваться при моделировании работы гидроакустических средств освещения подводной обстановки в заданной акватории и при их разработке.

Работа выполнена в СПбГЭТУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0149 от 01.12.2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбань И. И. Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях. Киев: Наук. думка, 2008. 75 с.

2. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов: в 2 т. Т. 1: Оптимальные методы / ОАО «Концерн ЦНИИ „Электроприбор“». СПб., 2011. 400 с.

3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

4. Цифровая обработка сигналов и MATLAB / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 512 с.

E. L. Sheinman, A. N. Afanasjev
«Oceanpribor» Corporation

M. S. Kupriyanov, D. M. Klionskiy, S. N. Ezhov, S. E. Polovtsev, A. M. Golubkov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SIMULATOR OF INPUT HYDROACOUSTIC SIGNALS OF AN INTEGRATED SYSTEM FOR UNDERWATER OBSERVATION

Discusses a simulator of input signals for hydroacoustic tools of underwater observation. The algorithms for simulating noise radiation of sea objects are considered together with the algorithms for simulating direct and reflected active hydroacoustic signals. We provide the examples of calculating input signals for detection modes of hydroacoustic complexes. Software implementation of the simulator is described in C++ created in Qt Creator environment using the class diagram and use case diagram. We consider the influence of the Doppler effect. Formation of active signal spectra are considered in the mode of hydroacoustic means detection. We describe the interaction of the simulator with an external module - system of hydrological calculations - for obtaining information on the hydrology of sea environment. In order to set the experiment task, display the modes of noise-detection, active sonar, and hydroacoustic means detection we describe an interface implemented in QML.

Hydroacoustic signal, signal model simulator, active signal, noise signal, underwater observation tools
