

Труды МАИ. 2025. № 144

Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.)

РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 621.371.332.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186311>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ NCGEHF>

МАСШТАБНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РЕЖИМА ИНВЕРСНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ

Владимир Николаевич Трофимов✉

ФАУ «ГосНИИАС»,

Москва, Россия

✉vladtrof@gosniias.ru

Аннотация. Представлены технология и стенды масштабного физического ультразвукового моделирования (УЗМ) в гидроакустическом бассейне радиолокационных станций (РЛС) с инверсным синтезированием апертуры (ИСА). Описываются стенды для УЗМ режима ИСА при работе по самолетам и по морским судам. Стенды УЗМ могут использоваться при разработке новых РЛС, систем вторичной обработки радиолокационных изображений (РЛИ), автоматического распознавания объектов на РЛИ, а также в качестве учебного пособия для обучения по специальности радиолокация. Технология УЗМ включает в себя физическое моделирование эхо-сигналов, отраженных от объектов сложной формы, с использованием их масштабных моделей и последующую обработку этих сигналов с помощью математических моделей радиолокационных систем различных типов. Приводятся обобщенная структурная схема стендов УЗМ, характеристики их оборудования и параметры зондирующих сигналов. Представлены результаты

моделирования – РЛИ высокого разрешения, полученные с использованием масштабных моделей самолета и морского судна.

Ключевые слова: масштабное физическое ультразвуковое моделирование, инверсное синтезирование апертуры, радиолокационное изображение высокого разрешения.

Для цитирования: Трофимов В.Н. Масштабное физическое ультразвуковое моделирование радиолокационного режима инверсного синтезирования апертуры // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186311>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

SCALE PHYSICAL ULTRASONIC MODELING OF RADAR REGIME OF INVERSE SYNTHETIC-APERTURE

V.N. Trofimov✉

State Research Institute of Aviation Systems Leading Engineer

Moscow, Russia

✉vladtrof@gosniias.ru

Abstract.

Key words: scale physical ultrasonic modeling, inverse synthetic aperture, high resolution radar image.

For citation: Trofimov V.N. Scale physical ultrasonic modeling of radar regime of inverse synthetic-aperture // Trudy MAI. 2025. № 144. (In Russ.)
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186311>

Введение

При разработке РЛС с инверсным синтезированием апертуры (ИСА) применяется математическое моделирование, в котором можно отдельно выделить математическую модель (ММ) формирования эхо-сигналов, отраженных от объектов

сложной формы (самолеты, морские объекты и т.п.) и модель обработки этих сигналов в РЛС для получения радиолокационных изображений (РЛИ).

Для моделирования эхо-сигналов в ММ обычно используются простые многоточечные модели объектов, которые могут достаточно хорошо применяться для отработки собственно алгоритмов получения выходных РЛИ. Но подобные упрощенные РЛИ значительно отличаются от реальных РЛИ, так как при их формировании не учитываются множество физических явлений, таких как взаимные затенения элементов конструкции объекта, многократные переотражения сигналов элементами объекта и т. п.

Расчет в ММ эхо-сигналов с использованием 3-D моделей объектов и учетом указанных выше физических явлений является сложной задачей, особенно при необходимости моделирования влияния подстилающей поверхности. При этом оценка качества получаемых результатов возможна только сравнением с РЛИ, полученными в натурных экспериментах.

Масштабное ультразвуковое моделирование (УЗМ) радиолокационных (РЛ) эхо-сигналов, отраженных от масштабных моделей протяженных объектов сложной формы, позволяет получать результаты, близкие к реальным, так как является по своей сути натурным экспериментом. УЗМ основано на аналогии законов распространения и отражения для акустических и электромагнитных волн, которая была отмечена Релеем в начале двадцатого века [1]. Отсутствие в ультразвуковых (УЗ) волнах поляризационных свойств не играет существенной роли при моделировании большинства типов РЛ систем.

Масштабный коэффициент, в котором изготавливаются акустические модели объектов, должен быть равен волновому масштабу $M_v = \lambda_{\text{э}} / \lambda_{\text{а}}$, где $\lambda_{\text{э}}$ - длина электромагнитной волны моделируемой РЛС, а $\lambda_{\text{а}}$ - длина акустической волны используемой на стенде УЗМ. Для гидроакустического УЗМ обычно применяют частоты не более 10 МГц из-за квадратичной зависимости от частоты поглощения ультразвука в воде. Для сантиметрового РЛ диапазона M_v может достигать значения, равного приблизительно 100, а для дециметрового -1000.

УЗМ можно проводить также в воздушной среде, но в этом случае значение M_v ограничено значительным затуханием ультразвуковых акустических волн на высоких частотах. Обычно используемая для воздушного УЗМ частота, равная приблизительно 40 кГц, для 3-х сантиметрового диапазона длин РЛ волн обеспечивает $M_v = 4$.

УЗМ может применяться при создании новых перспективных РЛС высокого и сверхвысокого разрешения, многопозиционных и сверхширокополосных РЛС, а также систем автоматической идентификации объектов. В [2, 3] представлены примеры применения УЗМ в воздушной среде для разработки РЛ систем с синтезированием апертуры (СА). В [4] описан гидроакустический комплекс УЗМ малобазовой многопозиционной РЛС с одной приемной и несколькими передающими антеннами.

В [5, 6] рассматриваются возможности применения искусственных нейронных сетей для распознавания объектов, где для получения обучающих наборов данных применяется математическое моделирование РЛИ с использованием простых геометрических представлений объектов. В качестве обучающих данных возможно использование РЛИ, полученных путем УЗМ с помощью масштабных моделей реальных объектов.

Обобщенная структурная схема стенда и технология УЗМ

Описание основных принципов и технологии УЗМ режима ИСА представлены в источнике [7].

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема стенда УЗМ.

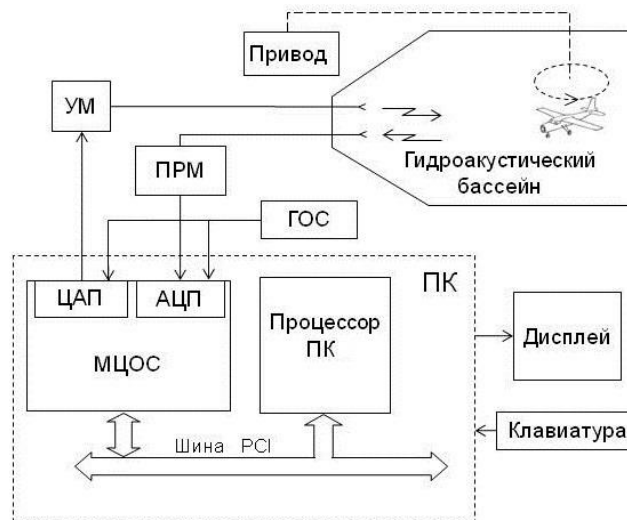


Рис. 1. Структурная схема гидроакустического стенда УЗМ

Масштабная модель размещается в гидроакустическом бассейне (ГАБ), размеры которого определяются типом решаемой задачи и длиной акустической волны. Для моделирования режима ИСА при работе по воздушным объектам модель подвешивается на электромеханическом приводе (ЭМП) с помощью тонких нитей и вращается в горизонтальной плоскости.

Для полного моделирования режима ИСА при работе по морским объектам ЭМП должен иметь три степени свободы и обеспечивать вращение модели в трех плоскостях с жесткой фиксацией модели на ЭМП. Такой привод имеет сложную конструкцию, поэтому на рассматриваемом стенде используется ЭМП с одной степенью свободы, позволяющий вращать модель в одной вертикальной плоскости.

Для получения на стенде по возможности больших значений M_v необходимо использовать УЗ сигналы с наименьшей возможной длиной волны. Основное ограничение на выбор длины волны связано с ослаблением амплитуды УЗ сигналов из-за их поглощения молекулами воды. Величина поглощения имеет квадратичную зависимость от частоты и характеризуется коэффициентом δ / f^2 , где f - частота УЗ сигналов. Значение этого коэффициента и формулы для расчета поглощения приведены в [8]. Например, для частоты 2 МГц поглощение будет составлять величину 0,9 дБ / м, а для частоты 6 МГц будет равно 8 дБ / м.

Для формирования зондирующих ультразвуковых сигналов (ЗУС) на стенде УЗМ используется прямой цифровой синтез в модуле цифровой обработки сигналов (МЦОС), установленном в персональном компьютере (ПК). Благодаря этому аппаратуру стенда можно программно настраивать на моделирование РЛС с различными типами зондирующих сигналов и с необходимым разрешением по дальности. Сформированные в цифровом виде ЗУС передаются на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а с его выхода через усилитель мощности (УМ) поступают на вход передающей ультразвуковой антенны (УЗА).

В сеансе УЗМ после включения ЭМП осуществляется прием и регистрация эхо-сигналов, отраженных от модели, на некотором интервале времени. Сигналы от приемной УЗА после усиления в приемнике (ПРМ) преобразуются в цифровой вид с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и записываются в оперативную память (ОП), установленную на МЦОС. ОП имеет объем 256 Мбайт, что позволяет производить непрерывную запись эхо-сигналов течение нескольких секунд. ЦАП и АЦП, установленные на МЦОС, синхронизируются тактовыми импульсам от генератора опорного сигнала (ГОС). Частота тактовых импульсов ГОС должна не менее, чем в четыре раза превышать несущую частоту УЗ сигналов.

Вращение модели осуществляется равномерно. Угловой шаг записи эхо-сигналов равен отношению скорости вращения модели к частоте следования ЗУС. Таким образом, запись данных осуществляется в координатах дальность до модели (относительно УЗА) – угловое положение модели в горизонтальной плоскости для самолета либо в вертикальной плоскости для судна (бортовая или килевая качка).

Модель должна располагаться в рабочей зоне ГАБ, то есть в пространстве, где все элементы модели облучаются приблизительно с одинаковой мощностью. Размер рабочей зоны определяется шириной диаграмм направленности УЗА и расстоянием от УЗА до модели.

Данные из ОП после окончания сеанса УЗМ передаются в ПК и записываются в базу данных эхо-сигналов. Информация из базы данных используется для моделирования работы режима ИСА с использованием ММ РЛ системы и модели внешней обстановки. На основании данных от модели внешней обстановки

производится выбор из базы данных необходимых отсчетов эхо-сигналов и производится их дополнительная обработка.

При формировании эхо-сигналов в соответствии с рассчитанным в ММ положением объекта можно использовать интерполяцию соседних отсчетов сигнала из базы данных. Для повышения точности моделирования можно также производить запись эхо-сигналов с избыточностью, то есть с частотой превышающей минимально необходимую.

УЗМ режима ИСА при работе по самолетам

Для получения РЛИ самолета на стенде УЗМ использовался ЭМП для вращения модели в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 1.

В качестве широкополосных зондирующих сигналов в этом режиме были выбраны сигналы типа дискретных частотных последовательностей (ДЧП) [9]. Каждый сигнал типа ДЧП представляет собой пачку радиоимпульсов длительностью t_i , различающихся по частоте на величину $dF = 1 / t_i$. Прием эхо-сигналов осуществляется в промежутках между излучаемыми УЗ импульсами.

На стенде были использованы ЗУС типа ДЧП, состоящие из 32 импульсов длительностью $t_i = 40$ мкс, со средней несущей частотой ультразвука $F_0 = 4500$ кГц ($\lambda_a = 0,33$ мм), при этом ширина полосы ЗУС составила 800 кГц.

При моделировании РЛС 3-х сантиметрового диапазона длин волн такой сигнал обеспечивает $M_b = 100$. Для моделирования была использована выполненная в данном масштабе модель самолета «A-7 Corsair II», представленная на рис. 2.



Рис. 2. Гидроакустическая модель самолета «A-7 Corsair II»

Модель была изготовлена из эбонита и имеет металлизированную поверхность. Ее длина составляет 10 см, а ширина – 8 см.

На рис. 3 показаны результаты моделирования - РЛИ этого самолета, полученные на стенде УЗМ с использованием описанных выше ЗУС.

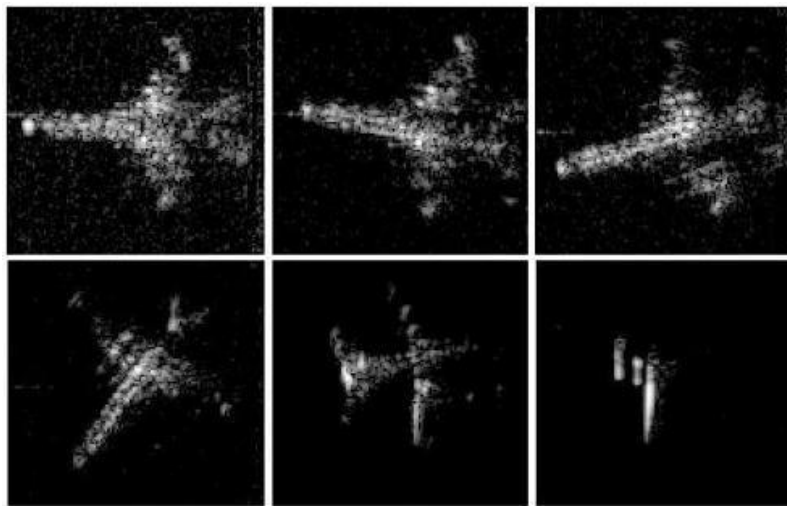


Рис. 3. РЛИ самолета «А-7 Corsair II» с разрешением 10 см ($\lambda_0 = 3,3$ см)

Координата – дальность на РЛИ расположена горизонтально, а облучение модели производилось с левой стороны. Представленные РЛИ имеют линейное разрешение по дальности и в перпендикулярном направлении, равное 1 мм для ультразвука, или 10 см для моделируемой РЛС 3-х сантиметрового диапазона. РЛИ были получены для нескольких ракурсов в диапазоне от 0° до 180° . Из-за большого динамического диапазона сигналов в РЛИ перед их выводом проводилось нелинейное преобразование яркости в логарифмическом масштабе относительно элемента с максимальной яркостью.

На рис. 3 представлены только части выходных РЛИ, содержащие изображение самолета. Полное РЛИ на выходе системы обработки сигналов стенда УЗМ состоит из 500 элементов разрешения по дальности (столбцов) и 128 элементов в перпендикулярном направлении (строк). Подробнее процесс УЗМ режима ИСА при работе по самолетам описан в [10, 11].

УЗМ режима ИСА для получения РЛИ морских судов

Морские суда обычно имеют большую протяженность по сравнению с самолетами, поэтому РЛИ могут иметь более низкое разрешение. Принципы получения РЛИ морских объектов в режиме ИСА представлены, например в [12]. В данном режиме инверсное синтезирование апертуры может осуществляться за счет использования трех видов угловой качки - бортовой, килевой и курсовой.

При проведении УЗМ режима ИСА морских объектов в воду погружают только верхнюю часть модели судна, которую жестко монтируют на ЭМП. Описываемый в настоящей работе стенд УЗМ имеет ЭМП с одной степенью свободы, позволяющий моделировать качку только в вертикальной плоскости (бортовая или килевая качка). При совпадении оси вращения ЭМП со строительной осью судна моделируется бортовая качка, а если ось вращения перпендикулярна оси, то моделируется килевая качка. Моделирование режима ИСА при курсовой качке проводится с помощью ЭМП для вращения модели в горизонтальной плоскости, но с жесткой фиксацией на нем модели.

Ограниченные размеры ГАБ стенда при соблюдении волнового масштаба обеспечивают УЗМ с моделями относительно небольших судов. В качестве такого объекта бала выбрана моторная мега яхта «Ambrosia» длиной 65 м, гидроакустическая модель которой показана на рис. 4.



Рис. 4. Гидроакустическая модель морского судна

Модель изготовлена в масштабе 350 и имеет длину 18,5 см.

На рис. 5 представлена схема моделирования режима ИСА на стенде УЗМ для получения РЛИ морского судна в присутствии бортовой качки.

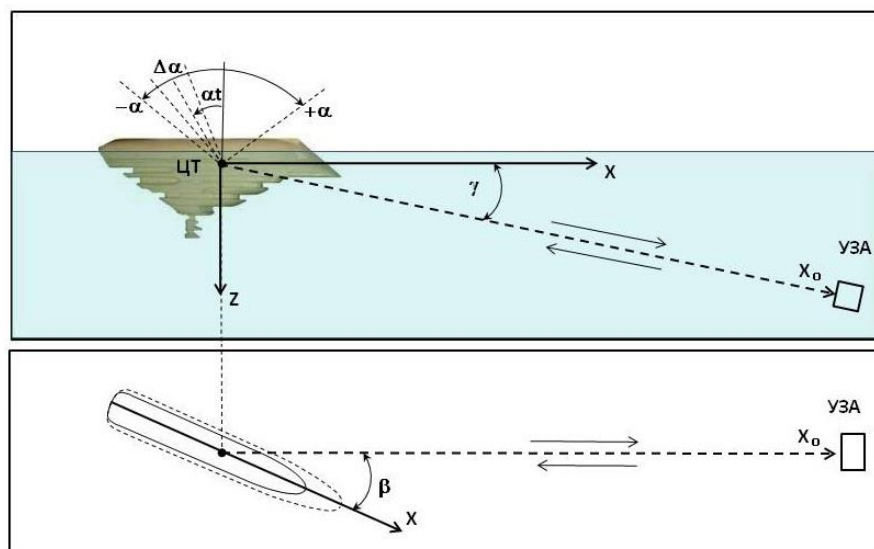


Рис. 5. Схема моделирования режима ИСА для бортовой качки

В процессе сеанса моделирования на стенде производится равномерное вращение модели вокруг оси X (строительной оси судна), в пределах углов от $-\alpha$ до $+\alpha$. Принимаемые при этом эхо-сигналы непрерывно записываются в ОП МЦОС. После окончания сеанса моделирования полученный массив эхо-сигналов переписывается в базу данных в ПК.

Дальнейшее математическое моделирование режима ИСА должно проводиться в ПК с использованием данных о положении и перемещениях судна и носителя РЛС в пространстве, а также параметров угловой качки судна. При этом из полученного массива сигналов необходимо выбирать отсчеты для рассчитанного в ММ угла αt (углового положения судна в середине интервала ИСА) и углового интервала $\Delta\alpha$, на котором производится набор эхо-сигналов для ИСА.

Угол γ на рис. 5 - угол наклона точки модели, соответствующей центру тяжести (ЦТ) судна, относительно УЗА. Угол между строительной осью судна (X) и проекцией линии визирования на горизонтальную плоскость (β) определяет линейное разрешение (DS) по оси X . Углы γ и β устанавливаются перед началом сеанса моделирования. Если линейное разрешение РЛС, получаемое после сжатия эхо-сигналов по дальности равно DR , то DS определяется формулой:

$$DS = DR / (\cos \beta \cos \gamma). \quad (1)$$

Представленные далее РЛИ судна были получены для малых значений углов β и γ , при которых DS и DR приблизительно равны. Поэтому на РЛИ судна по горизонтали откладывалась дальность, измеряемая РЛС (по оси X_0).

На рис. 6 показаны РЛИ судна (рис. 4), полученные на стенде, предназначенном для моделирования РЛИ самолетов (описанном выше), но с использованием ЭМП для моделирования бортовой качки.

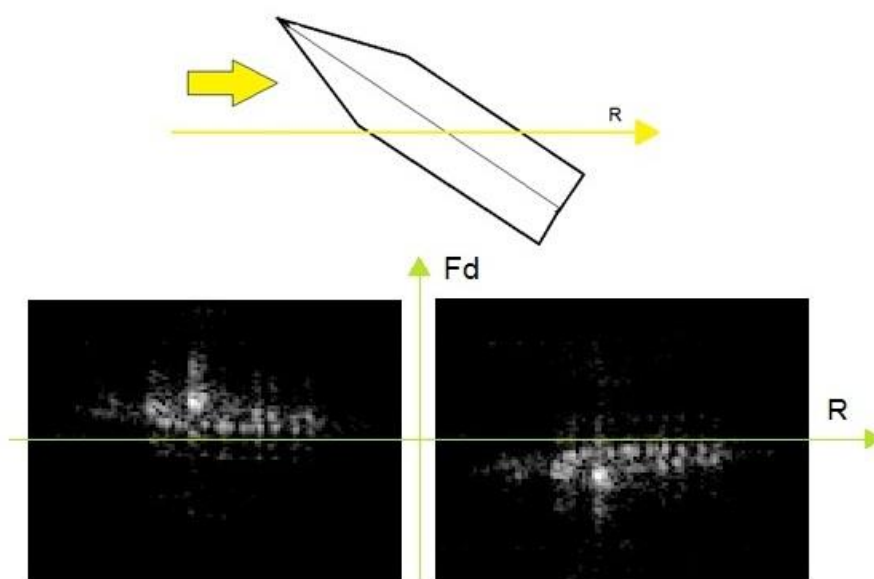


Рис. 6. РЛИ судна, полученные при бортовой качке с разными знаками

Правое и левое РЛИ на рис. 6 были получены для одного и того же углового интервала $\Delta\alpha$, нулевого значения угла αt , но для противоположенных направлений вращения модели. На рис. 6 показаны ось дальности R и ось доплеровской частоты F_d . Угол β имел значение, равное 40° . Оба РЛИ полностью идентичны, но располагаются зеркально относительно оси R , проходящей через нулевую доплеровскую частоту F_d .

Линейное разрешение в РЛИ на ультразвуке по дальности и в перпендикулярном направлении составило приблизительно 1 мм. РЛИ недостаточно полно отображают силуэт судна из-за малого размера рабочей зоны (не умещаются нос и корма судна), но показывают почти полную идентичность результатов моделирования эхо-сигналов в режиме ИСА при бортовой качке с разными знаками.

Для идентификации крупных морских судов, можно использовать РЛИ с более низким линейным разрешением, чем РЛИ, предназначенные для идентификации самолетов. Представленные далее РЛИ судна были получены на стенде УЗМ с другими характеристиками ЗУС.

В качестве ЗУС применялись широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Использовалась более низкая средняя несущая частота УЗ сигналов - 2790 кГц ($\lambda_a = 0,53$ мм). Для данной частоты затухание сигналов (за счет поглощения ультразвука молекулами воды) составляет приблизительно 2 дБ / м и разница в мощности эхо-сигналов от начала и конца протяженного объекта незначительна.

Зондирующие ЛЧМ сигналы имели глубину частотной модуляции, равную 200 кГц, что позволило получить разрешение по дальности на ультразвуке, равное приблизительно 4 мм. При соблюдении требования равенства масштаба модели (350) и волнового масштаба УЗМ линейное разрешение по дальности моделируемой РЛС должно составлять 1,4 м, а средняя длина электромагнитной волны передатчика РЛС λ_0 должна быть равна 18,5 см.

На рис. 7 а) представлено РЛИ модели судна в виде его бокового силуэта, полученное с использованием зондирующих УЗ сигналов с ЛЧМ при бортовой качке, а на рис. 7 б) для сравнения показано РЛИ (вид сверху) эталонного объекта (ЭО), полученное с помощью таких же сигналов при повороте ЭО по курсу.

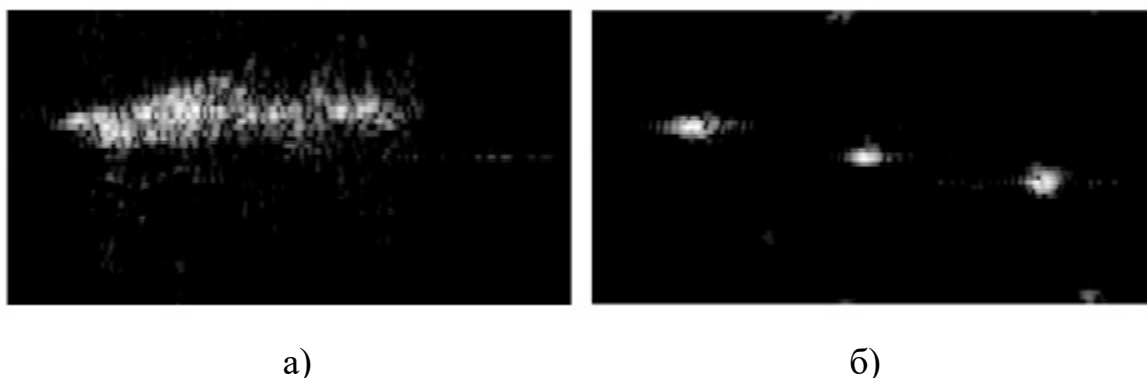


Рис. 7. РЛИ морского судна и эталонного протяженного объекта

При моделировании РЛИ, представленного на рис. 7 а), модель судна располагалась на расстоянии 1 м относительно УЗА. Были установлены углы $\beta = 20^\circ$,

$\gamma = 3^\circ$. Линейное разрешение на ультразвуке в РЛИ по дальности и по вертикальной оси (Z) на рис.7 а) составило приблизительно 4 мм.

Линейное разрешение по оси Z системы координат судна (рис.5) определяется углами $\Delta\alpha$, αt , β и γ . Для приблизительного расчета значения $\Delta\alpha$, требуемого для получения заданного разрешения по оси Z, рассмотрим упрощенный случай, когда $\alpha t = 0$, $\gamma = 0$ и необходимо разрешить две точки, расположенные на вертикальной оси Z системы координат судна, как показано на рис. 8.

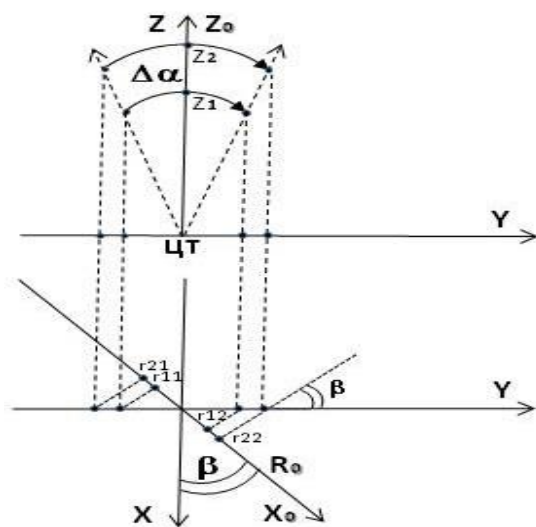


Рис. 8. Определение линейного разрешения в РЛИ судна по вертикали

На рис. 8 две точки на оси Z имеют координаты Z_1 и Z_2 , причем $DZ = Z_2 - Z_1$. Ось Z совпадает с осью Z_0 системы координат $X_0 Y_0 Z_0$ в середине интервала ИСА. Система координат $X_0 Y_0 Z_0$ неподвижна и имеет свое начало в ЦТ. На интервале синтеза ось Z совершает поворот на угол $\Delta\alpha$.

На рис. 8 проекция точки Z_1 на ось X_0 в начале поворота оси Z обозначена как r_{11} , а ее проекция на ось X_0 в конце поворота обозначается как r_{12} . Проекция точки Z_2 на ось X_0 в начале поворота оси Z обозначена как r_{21} , а r_{22} - ее проекция на ось X_0 в конце поворота. Точки Z_1 и Z_2 можно разрешить на оси Z с помощью доплеровской фильтрации на величину DZ при выполнении условия:

$$\lambda / 2 = (r_{22} - r_{21}) - (r_{12} - r_{11}) = DZ \sin \Delta\alpha \sin \beta.$$

Исходя из этого, можно рассчитать значение $\Delta\alpha$, необходимое для получения разрешения DZ. Если задать разрешения в РЛИ по горизонтали и вертикали равными

($DZ = DR$), то для заданных значений параметров ($\lambda = 0,53$ мм, $\beta = 20^\circ$, $DR = 4$ мм) величина угла поворота модели $\Delta\alpha$ должна иметь значение, приблизительно равное 10° . Такое значение угла $\Delta\alpha$ было использовано для получения РЛИ судна на рис. 7 а). Данное РЛИ было получено для идеализированных условий работы - угла $\alpha t = 0$, равномерного вращения модели и неподвижного ЦТ судна. Увеличение угла β ведет к уменьшению угла $\Delta\alpha$, необходимого для получения заданного разрешения по оси Z, но при этом происходит снижение разрешения DS в соответствии с формулой (1) и боковой силуэт судна сжимается по горизонтали..

ЭО на рис. 7 б) состоял из трех жестко связанных между собой отражателей (металлических цилиндров диаметром 10 мм), расположенных на одной линии в горизонтальной плоскости, и имел длину, равную длине модели судна. РЛИ ЭО было получено на том же стенде, что и РЛИ судна, но с использованием ЭМП для горизонтального вращения.

ЭО располагался на расстоянии 1 м от УЗА, а угол между осью ЭО и линией визирования в середине интервала ИСА составлял приблизительно 10° . Центральный отражатель ЭО совпадал с осью вращения и имел $Fd = 0$. Для получения РЛИ на рис. 7 б) ЭО был повернут в горизонтальной плоскости на $3,5^\circ$. Линейное разрешение в обоих направлениях при этом составило 4 мм.

На рис. 9 представлены РЛИ самолета «А-7 Corsair II» с разрешением 4 мм на ультразвуке или 40 см для электромагнитных волн, полученные стенде УЗМ для работы по морским судам при использовании ЭМП горизонтального вращения.



Рис. 9. РЛИ самолета «А-7 Corsair II» с разрешением 40 см ($\lambda_0 = 5,3$ см)

Моделирование отражений от морской поверхности

На рис.10 из [13] показаны пути распространения РЛ волн от РЛС до объекта и обратно.

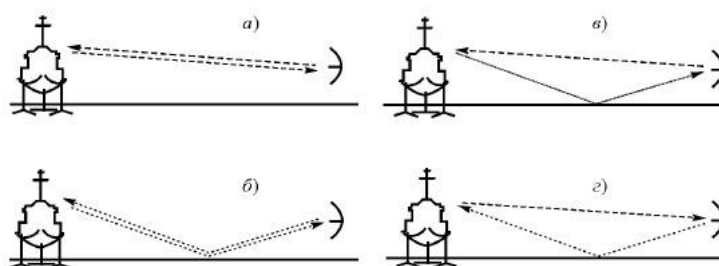


Рис. 10. Пути распространения радиоволн на морской поверхности

Одновременно с прямым распространением РЛ сигнала до объекта и обратно (рис.10 а) присутствуют сигналы, переотраженные от морской поверхности (рис.10 б, в, г). Такие сигналы модулируются при отражении от морской поверхности по случайному закону (по фазе и амплитуде) и суммируются с прямым сигналом. Это явление может оказывать значительное воздействие на работу режимов с ИСА.

Существует возможность УЗМ этого явления с помощью специальных способов и устройств. На рис. 11 из [7] схематически представлен стенд УЗМ, созданный в ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, на котором для моделирования волнения водной поверхности используется вентилятор.

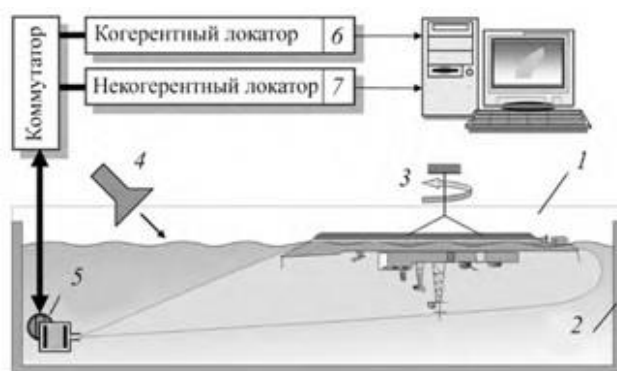


Рис. 11. Стенд УЗМ в ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова

Также на работу режимов с СА оказывают воздействие РЛ сигналы, отраженные от участков морской поверхности, находящихся на одинаковой

дальности с объектом справа и слева от него. При наличии волнения такие сигналы попадают в область спектрального анализа РЛС. Исследованию спектральных характеристик РЛ сигналов, отраженных от морской поверхности, посвящено большое количество работ. Для приближенной оценки ширины спектра данных сигналов по уровню -3 дБ можно использовать упрощенную формулу Натансона, приведенную в [14]:

$$\Delta F = 3,6 f_0 S,$$

где f_0 – несущая частота сигналов РЛС в ГГц;

S - состояние морской поверхности в баллах по шкале Дугласа.

Например, при 4-х балльном волнении для 3-х сантиметрового диапазона РЛ волн спектр имеет ширину, равную приблизительно 140 Гц. Физическое моделирование данного типа сигналов на стенде УЗМ представляется сложной задачей. Такие сигналы необходимо моделировать математически и суммировать с эхо-сигналами, полученными на стенде УЗМ.

Требования, предъявляемые к гидроакустическим моделям

К гидроакустическим моделям предъявляются два основных требования - высокая отражательная способность поверхности и хорошее поглощение УЗ сигналов внутри модели. Представленная на рис. 2 модель самолета изготовлена из эбонита, хорошо поглощающего ультразвук, но имеет металлизированную поверхность. Модель судна, показанная на рис. 4, была изготовлена из дерева на фрезерном станке «Roland MDX-20» и покрыта водозащитным лаком, который отражает сигналы хуже металла, но достаточно хорошо для проведения УЗМ.

Ниже на рисунках показаны РЛИ простых моделей с разрешением 1 мм на ультразвуке, полученные на стенде УЗМ, предназначенном для моделирования РЛИ самолета с ЭМП для горизонтального вращения.

На рис. 12 представлены РЛИ параллелепипеда, изготовленного из алюминиевого сплава, полученные для разных углов облучения.

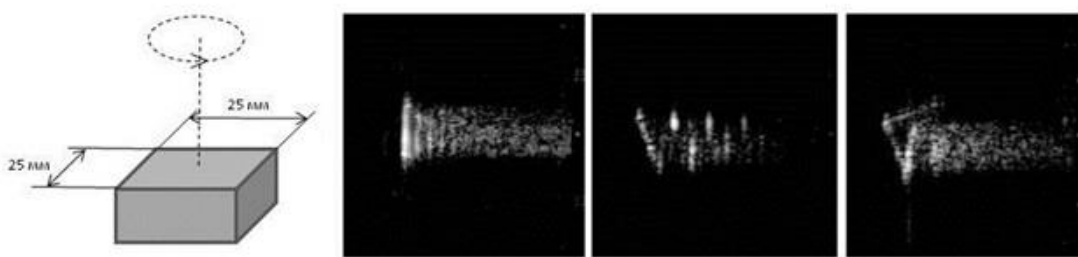


Рис. 12. РЛИ параллелепипеда, изготовленного из алюминиевого сплава

На изображениях видны ложные отметки за пределами объекта, возникающие из-за слабого поглощения ультразвука в металле и многократных переотражений сигналов внутри объекта («звоны»).

На рис. 13 показаны РЛИ сложного объекта - параллелепипеда из оргстекла, содержащего внутри себя два металлических цилиндра.

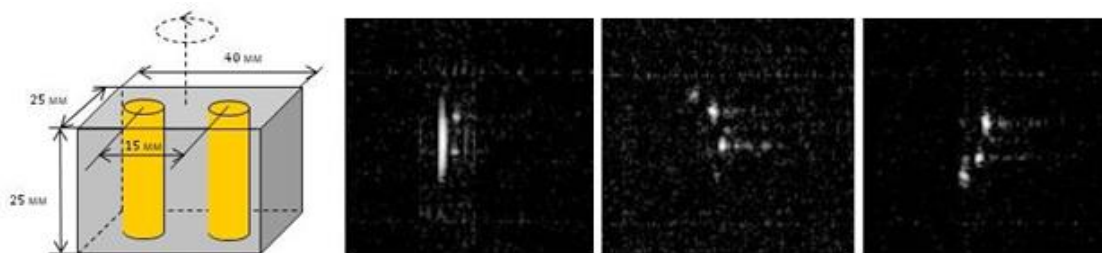


Рис. 13. РЛИ параллелепипеда из оргстекла с металлическими вставками

При получении РЛИ данного объекта (рис.13) стенд УЗМ фактически работал в качестве иммерсионного сканера с линейным разрешением 1 мм.

Исследования характеристик моделей, изготовленных с помощью 3-D принтера показали, что они также могут быть использованы для проведения УЗМ.

Сравнительная оценка реальных РЛИ и РЛИ, полученных на стенде УЗМ

На рис. 14 из [15] показаны РЛИ лайнера, полученные в режиме ИСА с помощью наземной бистатической РЛС S диапазона (7,5 – 15 см), использующей зондирующие сигналы с шириной спектра 200 МГц.

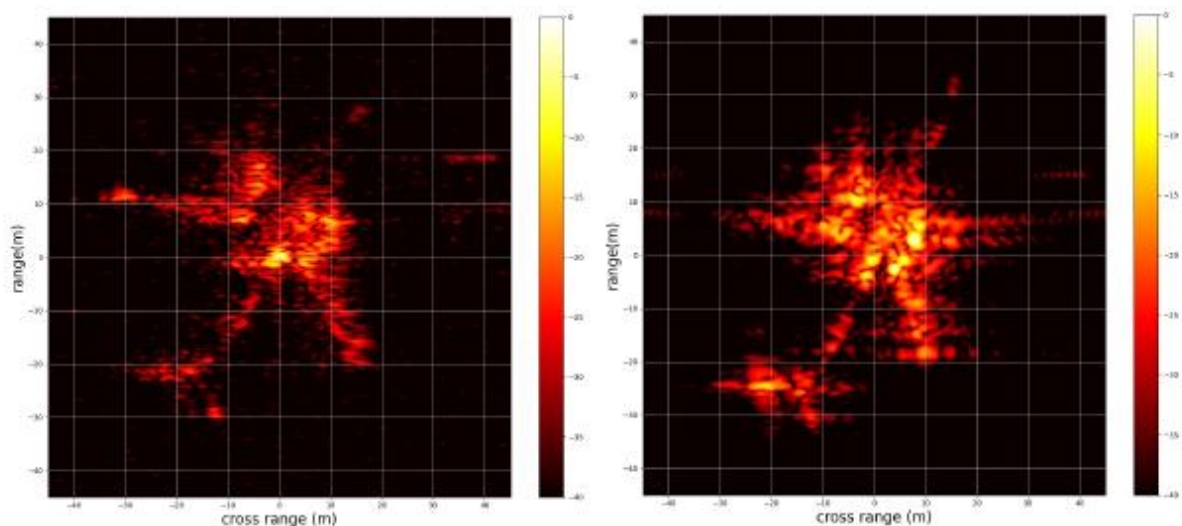


Рис. 14. Реальные РЛИ самолета, полученные в режиме ИСА

РЛИ были получены синхронно в моностатическом режиме работы РЛС (слева) и в бистатическом режиме (справа) для бистатического угла, равного $11,1^\circ$.

Разрешение по дальности в РЛИ составляет 75 см, а в перпендикулярном направлении – 83 см. Длина лайнера равна приблизительно 60 м, поэтому по его оси должно уложиться около 80 элементов разрешения по дальности РЛС.

Для полученных на стенде УЗМ РЛИ самолета «А-7 Corsair II» на рис. 3 и рис. 9 по его длине укладываются 100 и 25 элементов дальности соответственно. Реальное РЛИ (рис. 14) и РЛИ, полученное на стенде УЗМ (рис. 3) по качеству и детальности воспроизведения изображений самолетов близки между собой. РЛИ на рис. 9 имеет качество, недостаточное для идентификации самолета.

На рис. 15 из [16] представлено РЛИ морского судна и сценарий его получения за счет использования бортовой качки.

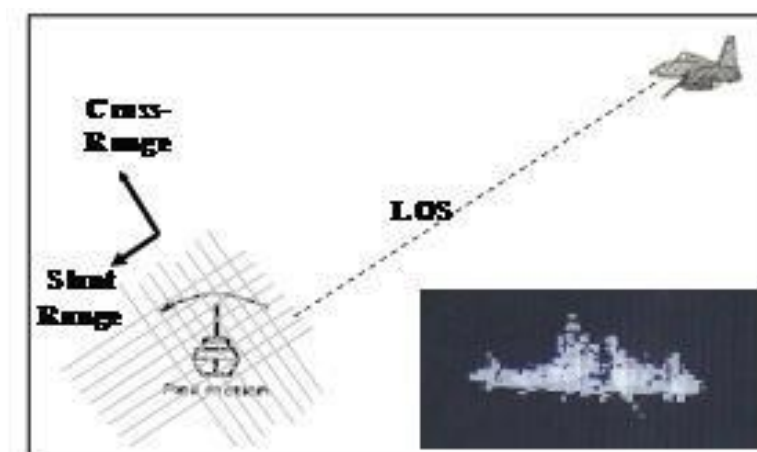


Рис. 15. РЛИ морского судна и сценарий его получения в режиме ИСА

На рис. 16 представлены фотография морского судна и его РЛИ из [17], полученное с помощью бортовой РЛС с воздушного носителя.



Рис. 16. Оптическое изображение морского судна и его РЛИ

РЛИ судна на рис. 7 а), полученное на стенде УЗМ, и реальное РЛИ судна на рис. 16 по качеству представления боковых силуэтов и их пригодности для идентификации приблизительно одинаковы, хотя РЛИ судна на рис. 16 имеет большую детальность в своем представлении.

Различия в угловом положении судов в РЛИ на рис. 7 а) и рис. 16 могут быть вызваны тем, что для получения РЛИ на рис. 7 а) моделировалась только бортовая качка. При получении РЛИ на рис. 16 кроме бортовой качки могли присутствовать также килевая качка и поворот по курсу.

Использование стендов УЗМ в научных и учебных целях

Масштабное физическое ультразвуковое моделирование может применяться как в исследовательских целях при разработке РЛС и систем автоматического распознавания объектов на РЛИ, так и в учебных целях. Например, в [18] описан стенд воздушного УЗМ РЛС с СА, установленный в Высшем институте авиации и космоса в Тулузе (ENSICA, Toulouse, France).

В [19] дано описание стенда воздушного физического моделирования РЛ систем с помощью ультразвукового лоатора, разработанного Севастопольским государственным университетом и Черноморским высшим военно-морским училищем имени П.С. Нахимова. Подобные стенды используют частоту УЗ сигналов, приблизительно равную 40 кГц, поэтому обеспечивают в десятки раз меньший волновой масштаб по сравнению с гидроакустическими стендами.

В [20] описан гидроакустический стенд «Acoustic System Trainer – SONAR Mk X», предназначенный для обучения основам радио и гидролокации. Стенд имеет ГАБ длиной 1,2 м и емкость 400 л. Рабочая частота используемых акустических сигналов равна 192 кГц. Стенд установлен в ряде учебных заведений различных стран мира.

Заключение

1. Стенд УЗМ является экономичным и эффективным средством, которое можно применять при разработке РЛ систем, использующих режимы с ИСА для получения РЛИ высокого разрешения самолетов и морских судов. Масштабное физическое УЗМ фактически является натурным экспериментом и, в отличие от ММ, не требует дополнительных исследований для проверки достоверности результатов.

2. Аппаратура и программное обеспечение стенда УЗМ позволяет моделировать РЛ эхо-сигналы для РЛ систем, работающих на различных частотах и с использованием разных типов зондирующих сигналов, включая сверхширокополосные. При использовании ГАБ соответствующих размеров возможно моделирование многопозиционных РЛ систем.

3. РЛИ объектов сложной формы, получаемые на выходе стенда УЗМ для упрощенных условий моделирования (равномерное вращение, неподвижный ЦТ) близки к РЛИ, которые должны формироваться на выходе РЛС с ИСА при оптимальной обработке реальных эхо-сигналов с компенсацией всех мешающих

факторов. Такие РЛИ, формируемые на стендах УЗМ, могут применяться для разработки систем автоматического распознавания воздушных и морских объектов.

4. Доступность и низкая стоимость оборудования гидроакустических стендов УЗМ, а также наглядность моделирования РЛ систем, позволяют использовать такие стенды в учебном процессе для обучения по специальности радиолокация.

Список источников

1. Lord Rayleigh “On the passage of waves through apertures in plane screens and allied problems” «Collected papers», v.4, Cambridge University Press Cambridge, Eng. 1902.
2. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?>.
3. Гусев С.Н., Миклин Д.В., Мороз А.В., Сахно И.В., Шерстюк А.В. Полунатурное моделирование цифрового канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн //Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?> DOI: [10.34759/trd-2020-113-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-08).
4. Оргиш П.И., Горшков С.А., Гуцев Р.А. Гидроакустическое моделирование малобазовой многопозиционной радиолокационной системы с кодированными взаимно-ортогональными фазоманипулированными зондирующими сигналами // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2018. №3. С 52-60.
5. Тонких А.Н. Применение нейросетевых технологий для распознавания распределенных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php? ID = 184504>.
6. Митькин М.А., Гаврилов К.Ю. Применение искусственных нейронных сетей для восстановления объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2025. №141. URL: <https://trudymai.ru/published.php? ID = 184505>.
7. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки

радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С. 143-157.

8. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М.Прохорова. Том 3. М: Советское радио, 1988. 657 с.

9. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы (теория и применение). М.: Советское радио, 1971. 289 с.

10. Трофимов В.Н. Технология и комплекс масштабного гидроакустического моделирования радиолокационных станций с синтезированием апертуры и зондирующими сигналами типа дискретных частотных последовательностей // Прикладная физика и математика. 2015. № 6. С. 24-33.

11. Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование РЛС с синтезированной апертурой малой дальности для БПЛА // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №9. URL: <http://jre.cplare.ru/sep19/7/text.pdf>. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.9.7](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.9.7).

12. Victor C. Chen, Marco Martorella. “Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging. Principle, Algorithms and Applications” SciTech Publishing, Edison, NJ. 2014.

13. Милаев А.В, Андреев А.Ю. Исследование влияния волнения водной поверхности на формирование радиолокационных портретов морских объектов на стенде гидроакустического моделирования // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова, 216. № 94, С. 167-174.

14. Maria S. Greco, Fulvio Gini. “Radar Clutter Modelling and Analysis” EGO Workshop 2012 – October 15-17, 2012 – Cashina – ppt download : презентация, слайд 42 // slideplayer.com>slide/10220220. 124 слайда. URL: <http://slideplayer.com>slide/10220220>.

15. Yousfi Fayin, Bruneel Pierre. “High Resolution Bistatic ISAR Image on Airlines” IRS 2023, May 2023, Berlin, Germany. HAL Id: hal-04171763. URL: <https://hal.science/hal-0417163v1>.

16. Bibhuti Bhusan Mohapatra, Vinod Kumar Jaysaval, Suchith Rajagopal, Abid Hussain. “Parallel ISAR Imaging of multiple targets with Airborne AESA Radar” VA Electronics & Radar Development Establishment, C V Raman Nagar, Bangalore-560093.

9th International Radar Symposium India - 2013 (IRSI - 13). URL: <https://scispace.com/papers/parallel-isar-imaging-of-multiple-targets-with-airborn-aesa-2cu03hukmr>.

17. Armin W. Doerry. "Ship Dynamics for Maritime ISAR Imaging" Sandia National Laboratories. SAND2008-1020 Unlimited Release Printed February 2008. DOI: [10.2172/929523](https://doi.org/10.2172/929523).

18. François Vincent, Bernard Mouton, Eric Chaumette, Claude Nouals and Olivier Besson. "Synthetic Aperture Radar Demonstration for Signal Processing Education Conference": Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on 3:III-709 - III-712. DOI: [10.1109/ICASSP.2007.366778](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366778).

19. Афонин И.Л., Байздренко А.А., Шереметьев К.С. Физическое моделирование ультразвуком радиолокационных систем с цифровыми методами обработки сигналов при их изучении в техническом ВУЗе // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021», С. 373-379.

20. PPT – itp101 PowerPoint Presentation, free download – [ID:4617496 www.slideserve.com>luther/itp101](https://www.slideserve.com/luther/itp101).

References

1. Lord Rayleigh "On the passage of waves through apertures in plane screens and allied problems" «Collected papers», v.4, Cambridge University Press Cambridge, Eng. 1902.

2. Zvonaryov V.V., Moroz A.V., Sherstyuk A.V. Metodika ocenivaniya kharakteristik diagrammy napravlenosti ul'trazvukovogo lokatora v rezhime sintezirovaniya apertury antennoy [Evaluation technique of direction pattern characteristics of an ultrasonic radar in the antenna aperture synthesizing mode] // Trudy MAI [MAI Works]. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?>.

3. Gusev S.N., Miklin D.V., Moroz A.V., Sakhno I.V., Sherstyuk A.V. Polunaturalnoye modelirovaniye tsifrovogo kanala peredachi dannykh v ul'trazvukovom diapazone dlin voln [Semi-natural modeling of digital data transmission channel in the ultrasonic wavelength range] // Trudy MAI [MAI Works] 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?> DOI: [10.34759/trd-2020-113-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-08).

4. Orgish P.I., Gorshkov S.A. Gutsev R.A. Gidroakusticheskoe modelirovanie malobazovoyi mnogopozitsionnoyi sistemy s kodirovannymi vzaimno- ortogonal'nymi fazomanipulirovannymi zondiruyushchimisignalami [Hydroacoustic modeling of a low-base multi-position radar system with coded mutually orthogonal sounding signals] // Vestnik Voennoyi akademii Respubliki Belarus' [Bulletin of the Military Academy of Belarus]. 2018. № 3. p. 52-60.
5. Tonkikh A.N. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiyi dlya raspoznavaniya raspredelyennykh ob`ektov na radiolokatsionnykh izobrazheniyakh [Application of neural network technologies for recognizing distributed objects in radar images] //Trudy MAI [MAI Works] 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php? ID = 184504>.
6. Mit'kin M.A., Gavrilov K.Yu. Primenenie iskustvennykh neyronnykh seteyi dlya vosstanovleniya ob`ektov na radiolokatsionnykh izobrazheniyakh [Application of artificial neural networks for the restoration of objects in radar images] // Trudy MAI [MAI Works] 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php? ID = 184505>.
7. Semin A.I., Trofimov V.N. Masshtabnoe fizicheskoe gidroakusticheskoe modelirovanie radiolokatsionnykh sistem polucheniya i obrabotki radiolokatsionnykh izobrazheniy vysokogo razresheniya [Scale physical hydroacoustic modeling of radar systems of receiving and processing high-resolution radar images]. // Izvestiya RAN [Proceedings of Russian Academy of Sciences]. Teoriya i sistemy upravleniya [Theory and control systems]. 2005. № 4. p.143-157.
8. Fizicheskaya entsiklopediya / Pod red. A.M. Prokhorova [Physical Encyclopedia / Ed. Prokhorov]. M: Sovetskoe radio [Moscow: Publishing House «Soviet radio»], 1988. Vol. 3. 657 p.
9. Kuk Ch., Bernfeld M. Radiolokatsionnye signaly (teoriya i primeneniye) [Radar signals (theory and application)]. M.: Sovetskoe radio [Moscow: Publishing House «Soviet radio»], 1971. 289 p.
10. Trofimov V.N. Tehnologiya i kompleks masshtabnogo gidroakusticheskogo modelirovaniya radiolokatsionnykh stanciy s sintezirovaniem appertury i zondiruyushchimi signalami tipa diskretnykh chastotnykh posledovatel'nostej [Technology and complex scale physical hydroacoustic simulation radar with synthetic aperture and the probing signals such

as digital frequency sequences]. // Prikladnaja fizika i matematika [Applied physics and mathematics]. 2015. № 4. p.24-33.

11. Trofimov V.N. Masshtabnoe fizicheskoe gidroakusticheskoe modelirovanie RLS s sintezirovannoyi aperturoyi maloyi dal'nosti dlya BPLA [Scale physical hydroacoustic modeling short-range SAR radar for UAVs] // Zhurnal radioelektroniki [Journal of radio electronics]. 2019. № 9. URL: <http://jre.cplare.ru/sep19/7/text.pdf>. DOI: [10.30898//1684-1719.2019.9.7](https://doi.org/10.30898//1684-1719.2019.9.7).

12. Victor C. Chen, Marco Martorella. “Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging. Principle, Algorithms and Applications” SciTech Publishing, Edison, NJ. 2014.

13. Milaev A.V, Andreev A. JU. Issledovanie vliyanija volnenija vodnoj poverhnosti na fotmirovanie radiolokacionnyh portretov morskikh ob`ektov na stende gidroakusticheskogo modelirovaniya [Study of the influence of water surface disturbance on the formation of radar portraits of marine objects at the hydroacoustic modelling stand]. // Trudy central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A.N. Krylova [The works of the Central Research Institute named after academician A. N. Krylov]. 2016. № 94. p167-174.

14. Maria S. Greco, Fulvio Gini. “Radar Clutter Modelling and Analysis” EGO Workshop 2012 – October 15-17, 2012 – Cashina – ppt download: // slideplayer.com/10220220. URL: <http://slideplayer.com/10220220>.

15. Yousfi Fayin, Bruneel Pierre. “High Resolution Bistatic ISAR Image on Airliners” IRS 2023, May 2023, Berlin, Germany. HAL Id: hal-04171763. URL: <https://hal.science/hal-0417163v1>.

16. Bibhuti Bhusan Mohapatra, Vinod Kumar Jaysaval, Suchith Rajagopal, Abid Hussain. “Parallel ISAR Imaging of multiple targets with Airborne AESA Radar” VA Electronics & Radar Development Establishment, C V Raman Nagar, Bangalore-560093. 9th International Radar Symposium India - 2013 (IRSI - 13). URL: <https://scispace.com/papers/parallel-isar-imaging-of-multiple-targets-with-airborn-aesa-2cu03hukmr>.

17. Armin W. Doerry. “Ship Dynamics for Maritime ISAR Imaging” Sandia National Laboratories. SAND2008-1020 Unlimited Release Printed February 2008. DOI: [10.2172/929523](https://doi.org/10.2172/929523).

18. François Vincent, Bernard Mouton, Eric Chaumette, Claude Nouals and Olivier Besson. "Synthetic Aperture Radar Demonstration for Signal Processing Education Conference": Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on 3:III-709 - III-712. DOI: [10.1109/ICASSP.2007.366778](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366778).
19. Afonin I.L., Bajzddrenko A.A., Sheremet'ev K.C. Fizicheskoe modelirovanie ul'trazvukom radiolokacionnyh sistem s cifrovymi metodami obrabotki signalov pri ikh izuchenii v tekhnicheskom vuze [Physical simulation using ultrasonic radar systems with digital signal processing methods when studying them in technical university] // Vserossijskaja otkrytaja nauchnaja konferencija "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija, rasprostranenija i difrakcii voln" [All-Russia Open Scientific Conference "Current problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction"] // "Murom 2021", p. 373-379.
20. PPT-ity101 PowerPoint Presentation, free download - ID:4617496.
[www.slideserve.com>luther/ity101](https://www.slideserve.com/luther/ity101)