

УДК 004.932.2

В.Ф. Миргород, канд. техн. наук, доц.,
А.Г. Кисель, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Одес. нац. политехн. ун-т,
И.М. Гвоздева, канд. техн. наук, доц., Одес. гос.
экологич. ун-т

ПОЛУНАТУРНОЕ МАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Ф. Миргород, А.Г. Кисель, І.М. Гвоздева.
Напівнатурне масштабне моделювання акустичних когерентних зображень. В рамках проблем дослідження акустичних когерентних зображень об'єктів дистанційного зондування пропонується інформаційна технологія моделювання таких зображень за допомогою спеціалізованого гідроакустичного комплексу та масштабних моделей типових об'єктів.

V.F. Mirgorod, A.G.Kisel, I.M.Gvozdeva.
Seminatural scale modelling of acoustic coherent images. Within the framework of research problems of acoustic coherent images of distance probing objects the information technology of modelling such images with the help of the specialized hydroacoustic complex and scale models of typical objects is offered.

Проблема моделирования процессов формирования и обработки акустических изображений объектов дистанционного зондирования имеет специфические и существенные особенности из-за высокой когерентности акустических полей, что связано с физической природой их формирования высокочастотными электромеханическими системами, сложностью явлений рассеивания на поверхностях объектов различной формы, значительным влиянием условий распространения сигналов в неоднородной среде. Прикладная значимость результатов исследований указанной проблемы обусловлена тем, что в ряде прикладных областей, например, в гидроакустике, медицинской диагностике, неразрушающем контроле, использование акустических полей является единственно возможным средством решения задач дистанционного зондирования.

Процессы распространения и рассеивания акустических волн являются предметом рассмотрения теоретической и прикладной акустики [1...3]. Самостоятельное значение в общей проблематике имеют исследования акустической томографии и голографии [4...6]. Решение задач имитации акустических изображений [7...9] необходимо для их правдоподобного воспроизведения.

Тем не менее проблема адекватного моделирования процессов формирования и обработки акустических изображений для задач дистанционного зондирования еще далека от полного решения. Это связано, в первую очередь, с существенным отличием формируемых изображений от их оптических аналогов вследствие различий в пространственно-временных масштабах и механизме формирования вторичного поля. Акустические изображения имеют преимущественно когерентный, бликовый характер [5...8], что затрудняет их исследование и обработку. Теоретические модели, основанные на приближениях Кирхгофа, не позволяют адекватно описать явления отражения от поверхностей сложной формы и поэтому недостаточно достоверны [2, 3, 5]. Вследствие этого проведение экспериментальных исследований по получению и обработке акустических когерентных изображений (АКИ) имеет важное значение для уточнения теоретических моделей и практическую ценность для получения основных признакообразующих характеристик исследуемых объектов.

Экспериментальное исследование процессов формирования АКИ для последующего компьютерного моделирования проведено в специализированном гидроакустическом комплексе.

Метод полунатурного физического масштабного моделирования [10] при помощи специализированного гидроакустического комплекса [11] основан на прямом измерении характери-

стик отражения акустического поля от масштабной модели объекта, которая выполняется акустически жесткой и воспроизводит характерные особенности поверхности реального объекта в необходимом масштабе. Главным достоинством метода является подобие физических процессов формирования вторичного акустического поля реального объекта и его масштабной модели, а точность получаемых данных определяется лишь точностью воспроизведения объекта, его моделью и точностью измерительной аппаратуры. По сравнению с прямым натурным экспериментом достигается минимизация затрат времени и средств, а также повторяемость результатов измерений независимо от состояния среды, что обеспечивает высокую достоверность получаемых данных.

Масштаб M воспроизведения выбирается, исходя из волнового уравнения для потенциала акустического поля [1,10] без учета затухания

$$\frac{\partial^2 \Phi(t, x)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \Phi(t, x)}{\partial^2 (ct)}, \quad (1)$$

где $\Phi(t, x)$ — потенциал акустического поля;

x — координата декартового пространства;

c — скорость распространения.

Уравнение (1) не изменится при переходе к новым переменным, которые соответствуют условиям физического масштабного моделирования с масштабом $1:M$,

$$x_m = \frac{x}{M}; \quad c_m t_m = \frac{ct}{M}, \quad (2)$$

где m — индекс, указывающий на принадлежность переменных условиям физического моделирования в гидроакустическом комплексе.

Критериальное уравнение согласно (2) имеет вид

$$M = \frac{x}{x_m} = \frac{ct}{c_m t_m}. \quad (3)$$

Если выполняются условия масштабного моделирования (3), то можно гарантировать идентичность процессов отражения от реальных объектов и их масштабных моделей в рамках линейной теории рассеивания.

При использовании импульсных сигналов с постоянной несущей частотой критериальное уравнение имеет вид

$$M = \frac{x}{x_m} = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{ct}{c_m t_m}, \quad (4)$$

где λ , τ — длина волны и длительность когерентного зондирующего сигнала, соответственно.

Согласно (4) следует два необходимых условия для масштабного моделирования:

— равенство волновых размеров объектов исследования: если модель реального объекта выполнена в масштабе $1:M$, то таким же должен быть масштаб для длины волны акустического колебания;

— равенство пространственно-волновых масштабов зондируемого поля: если скорости распространения в реальных условиях и при моделировании одинаковы, то продолжительность имитируемого сигнала необходимо уменьшить в M раз по сравнению с длительностью сигнала в реальных условиях.

Для ряда предметных областей, например, гидроакустики и с некоторыми допущениями медицинской диагностики, второе условие выполняется автоматически. В гидроакустике рабочие частоты соответствуют диапазону $10^3 \dots 10^6$ Гц, поэтому $M \gg 1$, и конкретное его значение определяется соотношением размеров комплекса [10] и масштабной модели.

Специализированный гидроакустический комплекс состоит из гидроакустического бассейна (ГАБ), вспомогательного и измерительного оборудования (соответственно ВО и ИО).

ГАБ представляет собой прямоугольный резервуар длиной 12 м, шириной 3 м и глубиной 2,5 м, размещенный в полуподвальном помещении на специальных амортизаторах для минимизации внешних воздействий. Поверхности стен резервуара покрыты специальной резиной с поглощением толщиной около 0,1 м, обеспечивающей минимальное значение уровня отражений в рабочем диапазоне частот 0,5...3 МГц. Содержимое резервуара представляет собой обычную воду, которая выдерживается в течение нескольких месяцев с целью минимизации содержания газа.

ВО ГАБ состоит из поворотного-координатного устройства, электроприводов и пульта управления ими. Поворотное-координатное устройство обеспечивает позиционирование модели в трех плоскостях, ее вращение с заданной скоростью и перемещение в заданном направлении. Модель объекта может устанавливаться с дискретностью в 1 град. по углам (ракурс, крен, дифферент), перемещается по глубине в диапазоне $\pm 0,25$ м от исходного положения, по дистанции $\pm 1,5$ м от исходного положения, а также в поперечном направлении по всей ширине ГАБ. ВО ГАБ позволяет имитирование изменения углов наблюдения реального объекта в трех плоскостях (азимут, угол места, угол тангажа), а также его собственное угловое положение относительно линии визирования — линии, соединяющей источник сигнала и объект.

Измерительное оборудование (ИО) (рис. 1) содержит: имитаторы приемных 1 и излучающих 2 антенн; усилители предварительные 3; усилитель мощности 4; электродвигатели 5 поворотного-координатного устройства; усилитель 6 с автоматической регулировкой усиления (АРУ); задающий генератор 7; преобразователь (делитель) частоты 8; формирователь квадратурных компонент 9; фазовый детектор 10; амплитудный детектор 11; частотный детектор 12; аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 13; цифровой процессор обработки и управления 14; средства 15 визуализации и документирования.

Имитаторы антенн 1 и 2 представляют собой пьезокерамические преобразователи с рабочими частотами 500 кГц, 2 и 3 МГц. Имитаторы антенн 1 и 2 используются для облучения исследуемой масштабной модели объекта и приема отраженных от нее сигналов. Размеры пьезоэлементов выбраны в диапазоне $(2...3,5) \cdot 10^{-2}$ м, что обеспечивает получение диаграмм направленности зондирующего поля различной ширины. Имитаторы 1 антенн разделены на две группы:

- используемые для измерения амплитудных характеристик отраженного сигнала;
- используемые для измерения фазовых характеристик отраженного сигнала.

ИО ГАБ обеспечивает три режима измерения.

Комбинированный режим “прием-излучение” (моностатическая локация).

Используется имитатор антенны, в котором излучатель и приемник находятся в одном корпусе, или используют два имитатора 1 и 2, закрепленных вместе и стационарно зафиксированных. Модель объекта при этом перемещается и/или вращается вокруг координатных осей.

Раздельный режим “прием-излучение” I (бистатическая локация).

Используются как минимум по одному имитатору приемной 1 и излучающей 2 антенн, разнесенных на требуемый угол (дистанцию) и стационарно закрепленных в требуемом для исследования положении. Модель объекта вращается и/или перемещается вдоль длины и ширины ГАБ.

Раздельный режим “прием-излучение” II (режим получения круговой диаграммы обратного рассеяния).

Используется как минимум по одному имитатору приемной 1 и излучающей 2 антенн. Имитатор антенны 1 перемещается вокруг стационарно закрепленной модели объекта по кругу радиусом 1,2 м, а имитатор 2 излучающей антенны является стационарным.

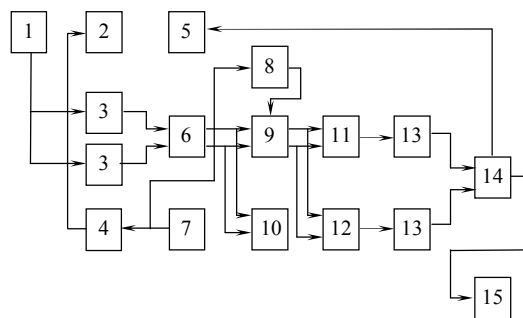


Рис.1. Схема измерительного оборудования

ИО обеспечивает функционирование ГАБ на следующих частотах: 500, 2, 3 МГц, в режимах непрерывного и импульсного формирования акустических сигналов. Длительность зондирующего сигнала может изменяться в пределах $2,5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ с с дискретностью $0,5 \cdot 10^{-6}$ с. Сигнальная мощность в импульсе регулируется в диапазоне 20...80 Вт. Кроме того, для частоты 2 МГц предусмотрен рабочий режим с линейной частотной внутриимпульсной модуляцией глубиной до ± 50 кГц. Чувствительность приемного тракта составляет $1 \cdot 10^{-5}$ В, соотношение сигнал/шум не менее 6 Дб, динамический диапазон ≥ 60 Дб.

После усиления в блоках 3 и 6 принятые сигналы в зависимости от поставленной задачи измерения поступают на вход формирователя 9 квадратурных компонент и/или фазового детектора 10. Цифровое представление принятых сигналов после детектора 11 или 12 обеспечивается АЦП 13. Обработка отраженных сигналов в цифровом виде по заданным алгоритмам осуществляется процессором 14. Результаты обработки подвергаются визуальному контролю и документированию в блоке 15. Математическое и программное обеспечение цифрового процессора 14 предоставляет широкие возможности статистической обработки получаемых сигналов — угловых сечений АКИ в различных режимах функционирования и для различных пространственных конфигураций.

Методика проведения экспериментальных измерений включает калибровку измерительного оборудования и определение программы измерений согласно поставленной задаче.

Калибровка измерительного оборудования осуществляется с помощью акустически жесткой калибровочной сферы известного диаметра, которая размещается в точке внутреннего пространства ГАБ, где предполагается установить модель исследуемого объекта. Измерительное оборудование содержит набор калибровочных сфер и цилиндров, отличающихся своими размерами. Конкретный тип калибровочной сферы или цилиндра выбирается в зависимости от предполагаемого уровня отраженных сигналов. Регистрируемая при калибровке амплитуда эхо-сигнала от калибровочной сферы вместе с теоретическими значениями эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) с учетом принятого масштаба моделирования заносится в память компьютера.

Уровни отраженных от исследуемой модели объекта и ее элементов сигналов, полученные в результате измерений, приводятся к стандартным в соответствии с соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2, \quad (5)$$

где σ — ЭПР модели объекта с учетом масштаба моделирования;

σ_0 — теоретическая ЭПР калибровочной сферы с учетом масштаба моделирования;

A — амплитуда эхо-сигнала исследуемой модели объекта;

A_0 — амплитуда эхо-сигнала от калибровочной сферы.

Методика проведения измерений определяется решаемой задачей: измерение круговых диаграмм обратного рассеивания (ДОР) объекта, амплитудных и фазовых характеристик, характеристик объекта при моно- и бистатической локации и т.д. Для исследования процессов формирования АКИ наиболее важным является получение амплитудных и пространственных распределений бликовых отражений, характеризующих форму и дислокацию элементов конструкций объекта. Методика измерений таких распределений состоит в следующем:

— выполняется калибровка измерительного оборудования с применением калибровочной сферы, ЭПР которой соответствует ожидаемому ЭПР элементов конструкций объекта;

— исследуемая модель объекта с помощью поворотного-координатного устройства устанавливается в требуемом месте внутри объема ГАБ и фиксируется в заданном угловом положении и на заданной дистанции;

— имитаторы приемной 1 и излучающей 2 антенн устанавливаются на глубине расположения модели объекта, реализуется комбинированный режим “прием-излучение” (моностатическая локация); дополнительно осуществляется контроль пространственного положения диаграмм направленности имитаторов антенн;

— с помощью компьютера задаются следующие параметры: несущая частота; минимальная длительность излучаемого импульса; величина стробирующей задержки приемника в зависимости от дистанции; период повторения зондирующих импульсов; интервал дискретизации по времени; время усреднения;

— полученные усредненные реализации огибающей эхо-сигнала заносятся в базу данных; дополнительно выполняется селекция элементарных отражений, определяются их относительные амплитуды согласно (5) и относительное временное (пространственное) положение по координатам максимальных значений;

— формат данных для индикации содержит признаки конфигурации: дистанция, углы разворота; амплитудное и временное (пространственное) распределение бликовых отражений относительно выбранного масштаба (5) и точки отсчета (геометрического центра модели или первого бликового отражения). Переход к другой конфигурации осуществляется путем изменения углов поворота модели объекта.

Измерения повторяют во всем исследуемом диапазоне углов с заданной дискретностью.

Для проведения экспериментальных измерений угловых сечений формирующих АКИ была использована выполненная в масштабе 1:200 модель реального объекта, содержащего как элементы сфер, цилиндров, так и уголкового конструкции: кромки, ребра, уголки, сочленения поверхностей разной кривизны, и имеющего вследствие этого сложную поверхность отражения.

Модель полностью воспроизводит поверхность реального объекта и является акустически жесткой с металлизацией поверхности отражения. Основные измерения распределения бликовых отражений в зависимости от изменения углов поворота выполнены для дистанции 4,75 м, которая соответствует зоне сферического фронта сигнала при использовании зондирующего сигнала длительностью 25...30 мкс. Дополнительно измерены огибающие эхо-сигналов при использовании зондирующих импульсов длительностью 100, 250 и 500 мкс для всех имитируемых углов поворота модели. Зондирующий сигнал в месте расположения модели не является прямоугольным импульсом, как это было установлено в процессе измерений. С помощью измерения отдельным гидрофоном, подвешенным в ГАБ рядом с моделью на той же дистанции, получена реальная форма его фронта, близкая к Гауссовой кривой, что было учтено при обработке данных измерений.

Основные результаты экспериментальных измерений представлены в виде таблиц (см. таблицу), содержащих для каждой пары значений углов наблюдения (азимутального и угла места) следующие данные об угловом сечении АКИ:

- число бликовых отражений, уровень которых превысил уровень шума ГАБ;
- амплитуды зафиксированных бликовых отражений, приведенные к уровню отражения эквивалентной калибровочной сферы;
- относительные задержки в абсолютном масштабе времени между каждым зафиксированным бликовым отражением и осью вращения модели объекта в горизонтальной плоскости.

Исходные данные экспериментальных измерений

Амплитуда огибающей эхосигнала, A , м	0,9	1,2	1,8	2,3	0,2	0,6	5,1	0,1
Задержка, T , мкс	350,6	325,0	300,0	266,0	212,5	187,5	159,4	125,0

Измерения выполнены в пределах изменения азимутальных углов $q=0...180$ град. через каждые 5 град. для углов наклона модели (углов крена) 0, +3, +6, +9 град. и через каждые 10 град. для угла наклона -7 град.

Двумерные массивы данных об амплитудном и пространственно-временном распределении бликовых отражений использовались в дальнейшем для компьютерного моделирования АКИ с различным пространственным разрешением.

Дополнительно зафиксированы измеренные огибающие эхо-сигналов при использовании зондирующих сигналов различной длительности в диапазоне 30...500 мкс для последующего

сопоставления с результатами компьютерного моделирования. Некоторые из таких эхо-сигналов приведены на рис. 2.

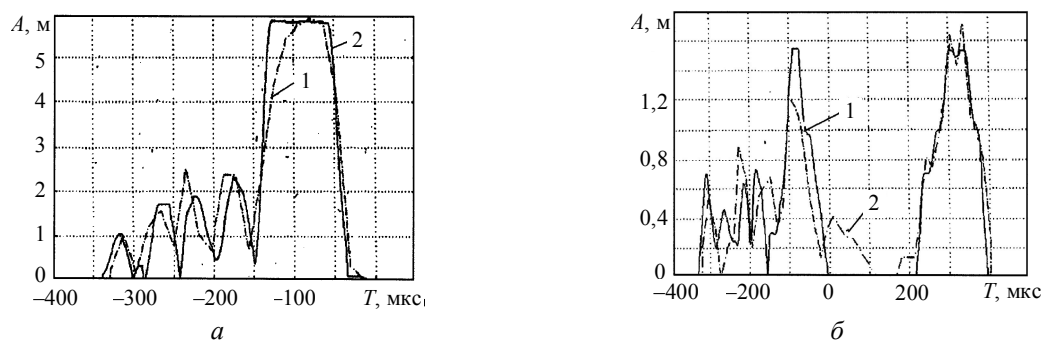


Рис. 2. Амплитуды огибающих эхо-сигналов экспериментального (1) и смоделированного (2) акустических когерентных изображений для азимутального угла $q=5$ (а), 20 град (б)

Достигнутая точность измерений определяется приведенным среднеквадратическим значением уровня шумов ГАБ в полосе частот ± 50 кГц относительно несущей частоты, которые в режиме калибровки составляет

$$a=4 \times 10^{-12} \times A_0.$$

Бликовые отражения, уровень которых ниже уровня шумов ГАБ, не регистрировались измерительным оборудованием.

Измерения временных интервалов выполнялись с погрешностью, не превышающей 1 мкс. Для определения положения мгновенного отражающего центра каждого бликового отражения фиксировалось положение максимума огибающей A эхо-сигнала, полученные результаты подвергались усреднению на нескольких тысячах реализаций, период повторения зондирующих импульсов составлял 20 мс.

Таким образом, как установлено в результате проведения экспериментальных исследований, метод полунатурного масштабного моделирования в специализированном гидроакустическом комплексе является средством получения основных признакообразующих характеристик акустических изображений объектов дистанционного зондирования. Точность такого моделирования определяется только точностью измерительного оборудования и точностью воспроизведения масштабной моделью особенностей поверхности отражения реальных объектов. Разработанная технология позволяет также получить с высокой достоверностью амплитудные и пространственно-временные распределения угловых сечений импульсной переходной функции рассеивания АКИ, необходимые для реалистичного воспроизведения вторичного акустического поля различных типов зондирующих сигналов и углов наблюдения.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в компьютерном моделировании АКИ с различным пространственным контрастом в сопоставлении с экспериментально измеренными.

Литература

1. Скучик Е. Основы акустики. В 2 т: Пер. с англ. / Под ред. А.М.Лямшева. — М.: Мир, 1976. — 1042 с.
2. Акустика океана / Под ред. Л.М.Бреховских. — М.: Наука, 1974. — 696 с.
3. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. — Л.: Судостроение, 1972. — 352 с.
4. Неттерер Ф. Математические основы компьютерной томографии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 288 с.
5. Качанов Е.И. Методы и средства гидроакустической голографии / Качанов Е.И., Пигулевский Е.Д., Ярыгин Е.М. — Л.: Судостроение, 1989. — 256 с.

-
6. Евдокимов В.Ф. Математическое моделирование сигналов и процессов в акустической голографии: проблемы и перспективы / Евдокимов В.Ф., Огир А.С. // Электрон. моделирование — 1996. — Т.18, № 4 — С. 29 — 33 .
 7. Миргород В.Ф. Имитация и реконструкция функций рассеивания когерентных акустических изображений // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып. 1(7). — С. 186 — 189.
 8. Миргород В.Ф. Комп'ютерне та експериментальне моделювання функцій розсіювання акустичних когерентних зображень / Миргород В.Ф., Ковешніков С.М., Гвоздева І.М. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2002. — Вып. 1 (17). — С. 167 — 170.
 9. Верлань А.Ф. Моделирование процессов формирования и обработки акустических когерентных изображений / Верлань А.Ф., Миргород В.Ф., Гвоздева И.М. // Электрон. моделирование. — 2004. — Т. 26, № 5. — С. 111 — 118.
 10. Штагер Е.А. Рассеивание радиоволн на телах сложной формы. — М.: Радио и связь, 1986. — 184 с.
 11. Бобер Р. Гидроакустические измерения: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Голенкова. — М.: Мир, 1974. — 364 с.

Поступила в редакцию 22 ноября 2005 г.