

УДК 681.883

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

А.Г. Кисель, И.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород.

Комп'ютерне моделювання процесів формування акустичних когерентних зображень у співставленні з експериментальними вимірами. Обґрунтовано інформаційну технологію комп'ютерного моделювання акустичних зображень, результати якої узгоджено з експериментальними даними.

A.G. Kisel, I.M. Gvozdeva, V.F. Mirgorod.

Computer modelling of processes acoustic coherent images formation in comparison to experimental measurements. The information technology of computer modelling of acoustic images is substantiated. The obtained results are consistent with experimental data.

Решение общей проблемы получения и интерпретации акустических изображений применительно к задачам дистанционного зондирования в предметных областях диагностики, неразрушающего контроля и гидроакустики не возможно без получения адекватных и компьютерно реализованных математических моделей процессов формирования вторичного акустического поля исследуемых объектов. Такие модели необходимы как на этапе создания соответствующих технических средств дистанционного зондирования, определяя принципы их построения, так и на этапе оценки эффективности созданной аппаратуры, позволяя выполнить ее тестирование для типовых задач. Основным требованием к таким моделям является их адекватность реальным процессам формирования вторичного акустического поля, т.е. экспериментальным данным.

Математические модели вторичного акустического поля — акустические когерентные изображения (АКИ) объектов дистанционного зондирования основаны на фундаментальных закономерностях теоретической [1] и прикладной акустики [2, 3]. Детализация фазовой интерференционной структуры (АКИ) является предметом акустической томографии [4] и голографии [5]. Отличительные особенности АКИ обусловили необходимость разработки новых подходов к решению проблем их имитации [6].

Однако решение общей проблемы адекватного моделирования процессов формирования и обработки АКИ для дистанционного зондирования сталкивается со значительными трудностями. Существенное различие пространственно-временных масштабов не позволяет в полной мере использовать методы обработки оптических аналогов. Когерентный, “бликовый” характер АКИ [6] недостаточно достоверно описывается теоретическими моделями, основанными на приближении Кирхгофа [2, 3]. Экспериментальные модели являются моделями сигналов, и не позволяют учесть особенность формы поверхности отражения.

Для определения условий применения теоретических моделей, имеющих практическую ценность при создании технических средств дистанционного акустического зондирования, предлагается разработанная информационная технология компьютерного моделирования АКИ в виде их угловых сечений на основании и в сопоставлении с экспериментальными измерениями в специализированном гидроакустическом бассейне.

Формирование АКИ в целом представляет собой многоступенчатый процесс излучения специальным образом сформированного зондирующего поля, его распространения в неоднородной среде, рассеивания на сложной поверхности объекта зондирования, обратного распространения, приема на фазированной антенной решетке (ФАР) датчиков и обработки (рис. 1) [7]. Исследование каждой стадии этого процесса требует построения соответствующих математических моделей преобразования волнового поля.



Рис. 1. Модели процессов формирования и обработки АКИ

Процессы излучения и распространения акустических сигналов в неоднородной среде достаточно хорошо изучены, созданы соответствующие математические и компьютерные модели [2]. Наиболее сложными являются процессы дифракции, или рассеивания, акустических волн на поверхности объекта и приема отраженных волн в плоскости приемной апертуры, а также последующей обработки принятых пространственно-временных полей. Центральная проблема — построение адекватных моделей рассеивания акустического поля на поверхности сложной формы. Наиболее рациональным путем решения указанной проблемы является декомпозиция процесса формирования АКИ и исследования процесса формирования вторичного поля без учета искажающего влияния среды распространения, т.е. получение пространственно-временной функции рассеивания в неискаженном виде. Такую возможность предоставляют комплекс исследований и экспериментальные измерения в специализированном гидроакустическом бассейне, заключающиеся в измерении пространственно-временных, амплитудных и фазовых характеристик вторичного поля масштабной модели объекта со сложной поверхностью отражения на частоте зондирования 2 МГц с сигналами различной разрешающей способности в диапазоне 30...500 мкс [7]. В цифровом виде создана база данных экспериментальных измерений угловых сечений АКИ для широкого диапазона углов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Алгоритмической основой для компьютерного моделирования является высокочастотное приближение Кирхгофа, условия выполнения которого были соблюдены в процессе измерений. Для потенциала отраженного от поверхности поля справедливо представление [3]

$$\Phi_{\text{отр}} = -\frac{jkQe^{j2kz_0}}{2\pi^2} \iint_S \frac{e^{-2jkf(\xi, \zeta)}}{[z_0 - f(\xi, \zeta)]^2} d\xi d\zeta, \quad (1)$$

где k — волновое число;

$$Q — \text{объемная производительность источника } \Phi_0 = \frac{Q}{4\pi z} e^{jkz};$$

z_0 — расстояние от источника до плоскости объекта;

$f(\xi, \zeta)$ — уравнение поверхности отражения в координатах (z, ξ, ζ) ;

S — поверхность отражения.

Обобщая результаты [3] на поверхность сложной формы, следуя методу стационарной фазы, можно получить из (1) для бликовой компоненты поля отражения

$$\Phi_{\text{отр}} = \frac{Q}{2\pi^2 z_0^2} \sum_{n=1}^N \sqrt{R_{1n} R_{2n}} \cdot e^{2jk[z_0 - f(\xi_n, \zeta_n)] + j\frac{\pi}{4}\delta_n}, \quad (2)$$

где R_{1n}, R_{2n} — главные радиусы кривизны в точке стационарной фазы (ТСФ) с координатами (ξ_n, ζ_n) ;

$\delta_n = \pm 1$ в зависимости от знака кривизны;

N — общее число различных бликовых отражений на фоне шумов.

Соотношение (2) дает основание предложить следующую форму функции рассеивания (ФР) бликовой компоненты вторичного поля

$$h(\tau, \alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{N(\alpha, \beta)} A_n(\alpha, \beta) \exp[j\varphi(\alpha, \beta)] \delta[\tau - \tau_n(\alpha, \beta)], \quad (3)$$

где $A_n(\alpha, \beta)$ — амплитудное распределение ФР;

$\varphi(\alpha, \beta)$ — фазовое распределение ФР;

$\tau(\alpha, \beta)$ — пространственно-временное распределение ФР;

α, β — углы наблюдения в двух плоскостях.

Представлена блок-схема компьютерного моделирования угловых сечений АКИ (рис. 2). Для компьютерного моделирования использована интерактивная среда MATLAB.

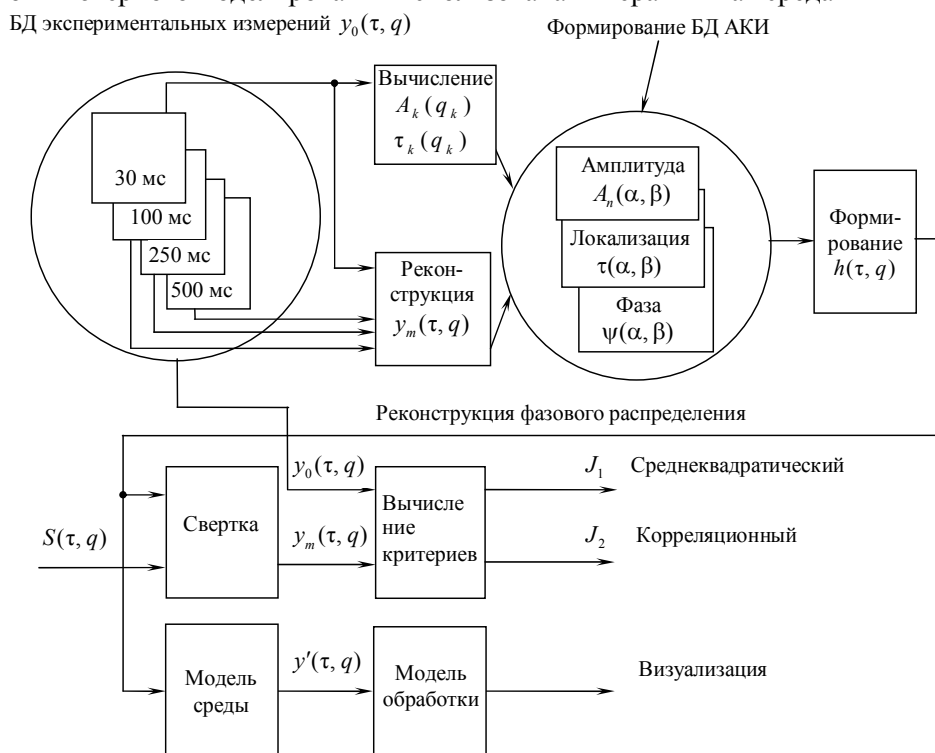


Рис. 2. Блок-схема компьютерного моделирования угловых сечений АКИ

Фрагменты баз данных (БД) экспериментальных измерений, соответствующих зондирующим сигналам высокой разрешающей способности, используются в качестве входных данных

для программного блока оценки параметров амплитудного и пространственно-временного распределения ФР для каждого угла наблюдения и дистанции. Угол в горизонтальной плоскости q — ракурс объекта [7]. Программный блок реконструкции фазового распределения реализует специальный алгоритм [7, 8] получения относительных фаз бликовых отражений, что дает возможность моделировать их интерференцию. На основе компьютерной обработки данных измерений формируется БД значений функции рассеивания (3) АКИ, определяемой только видом поверхности отражения исследуемого объекта.

Верификация модели ФР АКИ осуществляется путем ее свертки с зондирующим сигналом. Результат этой операции позволяет получить модельную реализацию $y_m(t)$ огибающей эхо-сигнала, которая сопоставляется с фактически измеренной реализацией $y_0(t)$ по двум критериям: корреляционному J_1 и среднеквадратичному J_2 . Результат моделирования среды позволяет получить огибающую сигнала $y'(t, q)$ для последующей ее визуализации.

Проведено сопоставление модельных и измеренных сигналов для двух различных углов наблюдения (рис. 3). Точность моделирования характеризует значение критериев для различных углов наблюдения и различных типов зондирующих сигналов. В диапазоне углов, для которого справедливо приближение Кирхгофа, достигнуты значения критериев $J_1 \geq 0,9$; $J_2 \leq 5\%$.

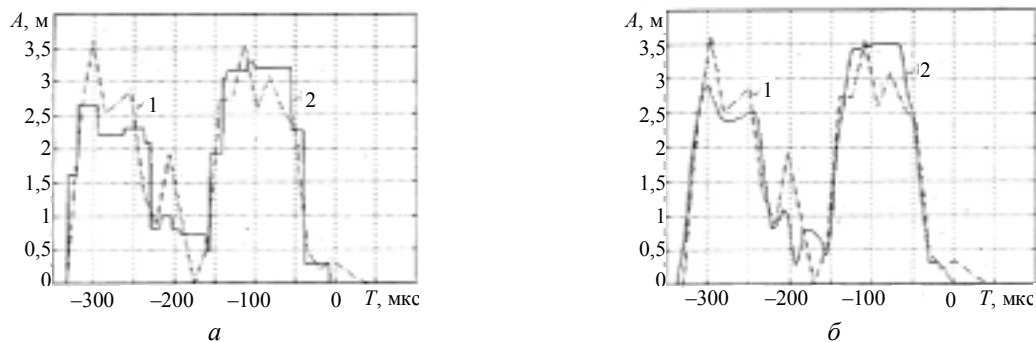


Рис. 3. Амплитуды огибающих эхо-сигналов экспериментального (1) и смоделированного (2) акустических когерентных изображений для азимутального угла: $q=0$ (а), 5 град (б)

Адекватность модели подтверждена также для сигналов, которые не использовались для реконструкции ФР АКИ. Поскольку свертка ФР с зондирующим сигналом известного типа с высокой достоверностью воспроизводит измеренные реализации с учетом характерной для АКИ интерференции, есть основания полагать, что такая свертка с зондирующими сигналами других типов в рамках ограничений модели дает возможность получить неизмеренные характеристики АКИ. Полученная модель ФР естественным образом дополняется моделью среды распространения, что дает возможность исследовать ее декоррелирующее влияние на отраженные от объекта зондирования сигналы. Принципиальный интерес представляют исследования эффективности различных видов обработки сигналов в ФАР для объектов, представленных ФР полученного типа. Такие исследования выполнены для двух типов обработки: диаграммоформирующей и фазовой оценки азимута [5]. Если диаграммоформирующая обработка оказалась достаточно устойчивой к особенностям ФР, то обработка с фазовой оценкой азимута объекта, представленного ФР типа (3), дает основание полагать наличие углового шума с существенно негауссовским законом распределения, что подтверждает известные результаты обработки интерференционных изображений.

Таким образом разработанная и реализованная информационная технология компьютерного моделирования процессов формирования и обработки АКИ предоставляет широкие возможности исследования специфических особенностей такого типа изображений, получаемых при дистанционном зондировании различных объектов. Высокая точность и адекватность моделей ФР, подтвержденные экспериментально, позволяют выполнить моделирование и оценку эф-

фективности различных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов в приемных трактах разрабатываемых устройств диагностики. Перспективы дальнейших исследований — оценка устойчивых признаков ФР, связанных с формой поверхности отражения и необходимых для решения задач классификации объектов.

Литература

1. Скучик Е. Основы акустики: Пер. с англ. В 2 т. / 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. Миргород В.Ф. Имитация и реконструкция функций рассеивания когерентных акустических изображений // Тр. Одес. политехн. ун-та — Одесса, 1999. — Вып. 1(7). — С. 186 — 189.
7. Миргород В.Ф. Полунатурное масштабное моделирование процесса формирования акустических когерентных изображений / Миргород В.Ф., Кисель А.Г., Гвоздева И.М // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2006. — Вып. 1 (25). — С. 204 — 211.

Поступила в редакцию 29 мая 2006 г.
