

В.Ф. Евдокимов, Киев

Н.А. Казакова, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОЧЕЧНО-ПОДОБНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ИХ ГОЛОГРАММНЫМ ОПИСАНИЯМ

Abstract. In the process of research, the principle of one-dimensional approximation of the phase hologram of inhomogeneous points in the volume of a sound pulse was substantiated. It is shown that the one-dimensional representation in the mathematical model of the phase hologram of the three-dimensional position of heterogeneous points in the form of a projection of their geometric position in the sound pulse on the object axis x does not distort the amplitudes (intensities) of the echo signals reconstructed in the system.

Актуальность

Для систем дефектоскопии, использующих при формировании изображений дефектов материалов исключительно амплитудное распространение поля отраженной волны характерно невысокое качество формируемых акустических изображений по пространственному и контрастному разделению, вследствие неоднозначности регистрируемых амплитудных параметров отраженного ультразвукового (УЗ) поля в зависимости от геометрического местоположения и формы дефекта, влияния сигналов-помех на адекватность акустических изображений, отображаемых в сигнале реальным дефектом, поскольку отображение контролируемого объема среды осуществляется по принципу мозаики с элементами различной яркости, определяемой эхосигналами от неоднородностей внутренней структуры (дефектов), так и аддитивными сигналами помех, имеющими реверберационную природу [1] и различные эксплуатационные дефекты типа усталостных трещин в продольном и поперечном направлении сварного шва, растрескивания в объеме зон термовлияния, местная деградация микроструктуры стали и т.п. состоят из мелких неоднородностей, либо имеют мелкую шероховатую структуру. Подобные дефекты сильно рассеивают УЗ волны, поэтому амплитуда эхосигналов от них слабо отражает их размеры, форму и местоположение [2].

Следует признать, что традиционные методы контроля материалов по амплитудным параметрам эхосигналов недостаточно надежно выявляют и оценивают дефекты отмеченного типа.

Постановка задачи

В ходе анализа [1, 3] рассмотрены математические модели формирования акустических изображений дефектов материалов в системах дефектоскопии, использующих различный формат регистрируемых

© В.Ф. Евдокимов, Н.А. Казакова

параметров волнового поля, отраженного неоднородностями зондируемого ультразвуковым лучом объекта контроля (ОК).

Решение задачи

По оценкам специалистов в области дефектоскопии материалов, создание современных систем формирования акустических изображений дефектов (неоднородностей) внутренней структуры материалов связано с использованием:

- когерентных и голографических методов на основе компьютерной обработки регистрируемых амплитудно-фазовых (фазовых) параметров волнового поля, рассеянного неоднородностями зондируемого объема материала [2, 4].
- решетки пьезодатчиков с параллельной и одновременной регистрацией фазовых либо амплитудно-фазовых звуковых голограмм элементарных объемов среды (материала), последовательно зондируемых звуковым импульсом в звуковом луче на линии сканирования [5, 6].

Приведенная в [2] математическая модель двумерной звуковой голограммы $U(x_0, y_0)$ в интегральном представлении имеет вид (1),

$$U(x_0, y_0) \cdot \frac{1}{j\lambda} \cdot \frac{z}{z^2 + x_0^2 + y_0^2} \cdot e^{jkz} \cdot e^{-\frac{jk}{2z}(x_0^2 + y_0^2)} \cdot \int \int_{x_1, y_1} U(x_1, y_1) \cdot e^{-\frac{jk}{2z}(x_1^2 + y_1^2)} \cdot e^{-\frac{jk}{z}(x_0 x_1 + y_0 y_1)} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

где x_1, y_1 – координаты точек-неоднородностей в объектной плоскости, x_0, y_0 – координаты точек плоскости регистрируемой голограммы, $U(x_1, y_1)$ – сигналы точечноподобных источников объектной плоскости (искомое изображение),

$U(x_0, y_0)$ – эхосигналы, регистрируемые в плоскости голограммы, z – расстояние между объектной плоскостью и плоскостью регистрации.

При регистрации одномерной голограммы линейной измерительной решеткой пьезоэлементов значение координат y_0, y_1 в (1) становится равным нулю, а с учетом одномерных представлений точек-неоднородностей в объеме звукового импульса, реконструкцию изображения точек объектной плоскости x_1, y_1 можно аппроксимировать реконструкцией ее точек – геометрических проекций на ось x_1 , коллинеарную с осью x_0 в плоскости голограммы x_0, y_0 .

С учетом выше отмеченного, уравнение (1) можно записать в виде

$$U(x_{ol} e) = 1/j\lambda \cdot z/(z^2 + x_{0l}^2) \cdot e^{jkz} \cdot e^{-(j k x_{0l}^2)/2z} \cdot \int U(x_{(1)}) \cdot e^{-j k / 2z x_{1l}^2} \cdot e^{-j k / z x_{ol} x_{1l}} \quad (2)$$

где k – волновое число, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,

$n + 1$ – количество приемников измерительной апертуры,

$l = -\frac{n}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, n/2$ – точки апертуры измерений.

В выражении (2) множитель $\frac{z}{z^2 + x_{0l}^2}$ отражает значение коэффициента, учитывающего затухание отраженной звуковой волны при распространении от звукового импульса до эхоприемников решетки с координатами z, x_{0l} . Множитель $\frac{1}{j\lambda} e^{jkz}$ является постоянной величиной для глубины

зондирования z , квадратичный фазовый множитель $e^{\frac{jkx_{0l}^2}{2z}}$ можно опустить, если восстанавливается только амплитуда колебаний в объектной плоскости на линии x_1 . Искомыми являются комплексные значения $U(x_1)$ в подынтегральном выражении.

Фурье-преобразование одномерной функции $U(x_1) \cdot e^{-\frac{jkx_1^2}{2z}}$, умноженное на соответствующий коэффициент A и является одномерной звуковой голограммой проекций точечных источников на ось, расположенных в объектной плоскости x_1, y_1 .

В дискретной форме интегральное уравнение (2) можно представить в виде:

$$U(x_{0l}) = A \cdot \sum U(x_{zl}) \cdot e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{zl}^2} \cdot e^{-\frac{j2\pi}{\lambda z} x_{zl}^2 \cdot x_{0l}^2} \quad (3)$$

где $i = -n/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, n/2$; n кратное 2.

$a = \frac{z}{z^2 + x_{0l}^2} \cdot \frac{1}{j\lambda} \cdot e^{jkz}$ является постоянной величиной для координаты x_{0l}, z .

Если предположить, что масштаб осей x_0, x_1 одинаков, то есть $x_{0l} = x_{1i}$, тогда комплексная амплитуда, регистрируемая вдоль оси x_0 , в точках апертуры x_{0l} будет представлять дискретную звуковую голограмму согласно математической модели (3), в которой число точек дискретизации апертуры равно $n+1$, i -я точка дискретизации оси x_1 указывает на местоположение x_{1i} i -го источника сферической волны на объектной линии x_1 .

Учитывая, что пространственная частота f_{x0} равна:

$$f_{x0} = \frac{x_0}{\lambda H} \text{ и } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (4)$$

можно показать, что одномерной голограмме $U_{x_{0l}}$ взаимно однозначно соответствует значение объектной функции $U(x_1)$, полученное в результате выполнения операции обратного преобразования Фурье функции одномерной голограммы.

Одномерный аналог значений восстановленной функции изображения объекта запишется в виде:

$$U(x_{1i}) = \frac{1}{A} \cdot \int_{f_{x0}} \left[U(f_{x_0}) \cdot e^{-\frac{j\omega x_{0i}^2}{2cz}} \right] \cdot e^{j2\pi f_{k0} - x_{1i}} df_{x_0} \quad (5)$$

В дискретной форме выражение (5) будет иметь вид:

$$U(x_{1i}) = \frac{1}{A} \cdot \sum_{l=1}^{n+1} \left[U\left(\frac{x_{0l}}{\lambda z}\right) \cdot e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{0l}^2} \right] \cdot e^{-\frac{j2\pi}{\lambda z} x_{1i} x_{0l}} \quad (6)$$

Как следует из (6), объектная функция $U(x_{1i})$ соответствует обратному преобразованию Фурье функции голограммы $U(x_{0i})$, умноженной на множитель, сопряженный фазовому множителю Френеля. Таким образом, алгоритм реконструкции акустического изображения точечного источника $U(x_{1i})$ по одномерной голограмме $U(x_{0i})$ можно определить следующим образом:

На первом шаге выполняется преобразование функции одномерной голограммы покомпонентным умножением на множитель, сопряженный фазовому множителю Френеля $e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{0l}^2}$

$$U'(f_{x_{0l}}) = U(f_{x_{0l}}) = e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{0l}^2} \quad (7)$$

Где U' – линеаризованная голограмма точечного источника, помещенного в точку x_{1i} с координатами z, x_{1i} .

Отметим, что фазовый множитель Френеля $e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{0l}^2}$ представляет дискретную голограмму точечного источника волны с единичной амплитудой и нулевой начальной фазой, помещенного в точку $x_l=0$ объектной оси x_l . Из выражения (6) следует, что после выполнения операции линеаризации функция $U(x_{1i})$ будет соответствовать Фурье-преобразованию линейной суммы пространственных гармонических составляющих $U\left(\frac{x_{0l}}{\lambda z}\right) \cdot e^{\frac{j\pi}{\lambda z} x_{0l}^2}$ с комплексными амплитудами U и пространственными частотами колебаний $2\pi \cdot x_{1i}/\lambda z$. (Заметим, что по условию дискретизации) $x_{1i} = x_{0l}$.

Процедура покомпонентного умножения фазовой голограммы может быть определена, как линейно-частотная демодуляция (ЛЧД), поскольку она исключает из функции фазовой голограммы компоненты, определяемые значениями фазы $\frac{\pi}{\lambda z} x_{0l}^2$ с квадратичной зависимостью от x_{0l} и оставляет в функции $U(x_{0l})$ гармоники с фазой, линейно зависящими от значений $U(x_{0l})$.

При спектральном разложении сигнала на конечном интервале, только частоты, совпадающие с частотами базиса, будут проецироваться на единственный базисный вектор, а сигналы с частотами, отличными от базисных, являются непериодичными в окне наблюдения, и их периодическое

продолжение имеет разрывы, которые дают спектральные вклады помех на всех базисных частотах, искажая значения амплитуд базисного вектора Фурье-преобразования.

В результате появляются т.н. вторичные максимумы Фурье-преобразования сигналов-помех, влияющие на точность восстановления амплитуды эхосигналов на растровой линии (линии сканирования). Чтобы уменьшить влияние конечности апертуры, уменьшают порядок разрыва на границе апертуры путем взвешивания данных одномерной звуковой голограммы вблизи границ апертуры. При этом выбор «окна» осуществляется таким образом, чтобы сигнал после взвешивания имел значительные проекции на базисный вектор с частотами, близкими к интересующим частотам в спектре сигнала.

Таким образом, поскольку в спектре линейаризованной голограммы нас интересует спектральная составляющая с пространственной частотой $f(x_0) = \frac{x_0}{\lambda z}$, где $x_0 = 0$, то все другие частоты спектра линейаризованной голограммы могут быть отфильтрованы, в т.ч. и частоты, соответствующие спектрам реверберационных сигналов-помех.

Если обозначить функции «окна» ω , то обработанная chebwin-фильтром голограмма будет соответствовать значениям $U'_w(f_{x_{01}})$

$$U'_w(f_{x_{01}}) = U'(f_{x_{01}}) * w \quad (8)$$

где знак $*$ обозначает покомпонентное умножение векторов $U'_w(f_{x_{01}})$ и w .

а) Операция оценки амплитуды эхосигнала U_{i1} в точке на акустической оси для определенного значения z осуществляется путем выполнения обратного Фурье-преобразования функции $U'_w(f_{x_{01}})$:

$$\widehat{U}_{1i} = \mathfrak{F}^{-1}\{U'(f_{x_{01}})\} \quad (9)$$

Таким образом, в результате выполнения алгоритма 1÷3, осуществляется оценка амплитуды сигнала, помещенного в точку i на объектной линии $x1$.

Следует отметить, что поскольку учитывать другие спектральные составляющие \widehat{U}_{1i} в растровом методе формирования изображения не имеет смысла, оценка \widehat{U}_{1i} осуществляется путем суммирования комплексных амплитуд вектора $U'_w(f_{x_{01}})$ и определением оценки интенсивности \widehat{E}_{1i} в виде

$$E_{1i} = \widehat{U}_{1i} \cdot U_{1i}^*, \quad (10)$$

где $*$ – знак сопряженной функции.

б) Полученные по данным реконструкции одномерных голограмм значения интенсивности в точках на акустической оси звукового луча (линии сканирования) для определенных значений z компонуются в растровую

линию изображения, а растровые линии – в акустическое двумерное изображение вертикального сечения исследуемой среды (объекта) (изображение типа В-скан).

Для регистрации амплитудных значений отраженного волнового поля разработаны, исследованы и широко применяются в системах дефектоскопии многоэлементные, ультразвуковые, электрически управляемые антенные решетки [6].

В разрабатываемой ИПМЭ НАН Украины голографической ультразвуковой системе контроля материалов в качестве акустической подсистемы сканирования объекта контроля используется линейная ультразвуковая антенная решетка пьезоэлементов, дополненная в каждом канале измерения аппаратной реализацией синхронного детектора фазы. На выходе синхронного фазового детектора регистрируется комплексная амплитуда, характеризующая волновое поле, создаваемое точечноподобными источниками сферических волн в объектной плоскости x_1, y_1 . Таким образом, система дефектоскопии голографического типа представляет многоканальный (по числу датчиков антенны) измерительно-вычислительный комплекс, в котором одновременно регистрируется и обрабатывается когерентное волновое поле эхосигналов, отраженных неоднородностями сканируемого объема при распространении звукового импульса в звуковом луче, формируемом УЗ решеткой пьезоэлементов.

В традиционных вычислительных схемах, используемых в зарубежных когерентных системах, приведение регистрируемых в датчиках комплексных амплитуд эхосигналов к значениям с равной фазой осуществляется путем выполнения операции временной задержки сигналов в аналоговой или цифровой форме на величину, пропорциональную фазовым углам голографических сдвигов. Однако задаваемые априори расчетные величины временных задержек не могут быть заданы в точном соответствии с реальными значениями фазовых углов ввиду флуктуаций скорости распространения звуковой волны от точечно-подобного источника на линии сканирования до пьезоэлементов антенной решетки. При этом вносимые погрешности в значения углов начальной фазы эхосигналов в различных датчиках приводит к выполнению операции суммирования тональных сигналов с различной начальной фазой, результат которой является частично стохастическим сигналом. В алгоритме, реализуемом в голографической системе, сопряженный фазовый множитель учитывает случайные флуктуации скорости распространения звуковой волны на всех траекториях распространения от точечно-подобных неоднородностей сканируемого объема до приемников антенной решетки.

Программа позволяет произвести расчет для массива входных данных, и визуально отобразить восстановленное изображение. В таком режиме также проводился эксперимент с отключением/выходом из строя части датчиков решетки. Восстановленное визуальное изображение при таком эксперименте пострадало в небольшой степени, что представлено на рис. 1



Рис. 1. График принятого эхосигнала, при выходе из строя датчиков № -28÷-19, 21-27

Выводы

Использование фазовой информации регистрируемых эхосигналов позволяет численно оценить влияние близлежащих сигналов-помех на точность вычислений амплитуд эхосигналов, а значит, и определить пространственную и контрастную разрешающую способность системы. Разрешающая способность голографической системы зависит от значения глубины (дальности) залегания исследуемой области. С увеличением рабочей частоты и размеров апертуры разрешающая способность системы улучшается, в то время как пространственная разрешающая способность не зависит от количества датчиков на апертуре измерений. Это является принципиальным отличием от акустических систем контроля с алгоритмами трансверсальной фильтрации при формировании зондирующего луча в режиме приема эхосигналов.

1. Бархатов В.А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений. Дефектоскопия, 2003, № 1, С.28-55.
2. Бадалян В.Г. Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных. Дефектоскопия, 2003, № 3, С.12-23.
3. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии. Задачи и перспективы, Дефектоскопия, 2004, № 11, с. 13-47.
4. Аксенов В.П. Применение радиолокационных методов оптимального обнаружения при ультразвуковом эхоконтроле. Дефектоскопия, 1982, № 2 с. 67-74
5. Method and apparatus for coherent image formation, US Pat. № 5.793.701. Date of Patent: Aug. 11. 1998
6. Method and apparatus for coherent image formation. Date of Patent: Apr. 9. 1998.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859629>

Поступила 16.09.2019г.