

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

УДК 681.3 : 534.2

В. В. Бачурин, И. Ю. Соловьев

(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Предлагается новый подход к вопросу определения координат источника акустического сигнала (дефекта сосуда давления), описываются разработанные на его основе алгоритмы и результаты их применения в сравнении с традиционными методами.

Введение. В настоящее время для контроля работоспособности и ресурса нефтехимических емкостей, сосудов давления и других металлических конструкций широко используются неразрушающие методы контроля. В частности, с точки зрения экономии времени и материальных ресурсов весьма эффективен метод, основанный на регистрации дискретных акустических сигналов.

Сигналы акустической эмиссии (АЭ) возникают при развитии дефектов поверхности конструкций (трещины, непровары, каверны и т. д.), проявляющихся во время прочностного нагружения испытываемого объекта.

Создаваемая и существующая аппаратура АЭ-контроля позволяют регистрировать времена прихода и параметры этих акустических сигналов. Для этого на поверхности контролируемого объекта закрепляется некоторое количество датчиков, сигналы с которых поступают в систему сбора и обработки информации. Число датчиков выбирают таким образом, чтобы сигнал АЭ, распространяющийся по конструкции, регистрировался хотя бы двумя соседними датчиками. Для контроля небольших аппаратов, длина которых 1—2 м, достаточно одного-двух датчиков, для более крупных объектов, например трубопроводов или больших (15 000 — 30 000 т) хранилищ, используют 100 и более датчиков. Требуемое количество датчиков также в значительной мере зависит от скорости затухания сигналов в объекте контроля (материала объекта, количества сварных швов, формы поверхности и т. д.).

Главная задача обработки сигналов — определение координат и степени опасности дефектов. О степени опасности дефектов судят при регистрации энергии сигналов, пиковой амплитуды, скорости нарастания и т. д. [1]. Координаты источника акустического сигнала (дефекта) определяются по разности времен прихода сигнала на датчики. При этом обработка сигналов обычно основывается на предположении о существовании некоторой единой для данного объекта модели скорости распространения (затухания) поверхностных волн. Усредненные коэффициенты модели для конкретной конструкции определяются по калибровочным данным [1]. В простейшем случае по результатам калибровки находится среднее значение скорости звука для данной конструкции.

Легко понять, что даже после введения единой скорости распространения звука по поверхности конструкции «прямое» решение задачи поиска координат источника акустического сигнала на основе разностей времен прихода сводится к решению системы нелинейных уравнений, где число уравнений, вообще говоря, равно числу датчиков, зафиксировавших данный сигнал, минус один.

Для примера рассмотрим систему из трех датчиков с координатами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) . Допустим, что датчики зафиксировали сигналы АЭ в моменты t_1 , t_2 и t_3 соответственно. Предположим, что источник сигнала АЭ имеет координаты (x, y) и сигнал был излучен в момент t_0 . В этом случае можно записать следующую систему уравнений:

$$c(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2};$$

$$c(t_2 - t_0) = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2};$$

$$c(t_3 - t_0) = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2}.$$

После простейших преобразований эти уравнения сводятся к классической нелинейной системе из двух уравнений с двумя неизвестными (x, y) .

Даже если отвлечься от вычислительных затрат, точное решение такой системы уравнений часто недостижимо из-за погрешностей измерения времени, наложения сигналов, сбоев в регистрирующей аппаратуре и локальных несоответствий скорости распространения поверхностных волн выбранной модели.

Для упрощения вычислений при локализации источника АЭ на практике часто используют «антенный» метод регистрации сигналов акустической эмиссии [2]. Антенной при этом называется некоторый фиксированный набор датчиков, расположенных строго определенным образом. Обычно датчики антенны представляют собой правильную геометрическую фигуру (треугольник, квадрат, звезду и т. д.), для которой система нелинейных уравнений существенно упрощается за счет использования геометрических характеристик антенны.

Можно отметить следующие недостатки существующих, в том числе и антенных, методов локализации источников АЭ:

Во-первых, подобрать единую модель скорости распространения поверхностных волн для большинства тестируемых аппаратов сложно, если вообще возможно.

Во-вторых, из-за сложной формы объекта, как правило, не удается соблюсти жесткие требования к относительному месторасположению датчиков на поверхности аппарата, необходимые для реализации антенны.

В-третьих, погрешности в определении разности времен прихода сигналов АЭ на датчики приводят к значительным ошибкам в определении координат.

Свою задачу авторы видят в том, чтобы разработать принципиально иной метод вычисления координат источника сигнала акустической эмиссии, лишенный по возможности указанных выше недостатков и при этом удовлетворяющий основным требованиям практики АЭ контроля нефтехимических сосудов давления и емкостей: получению координат источников с относительной погрешностью 5—10 % от базового расстояния между датчиками при условии минимальных затрат сил и средств на проведение мероприятий по подготовке испытаний.

Процедура калибровки. Перед началом исследования контролируемого объекта вне зависимости от используемого в дальнейшем метода определения координат дефектов необходимо получить информацию о временах распространения сигнала по поверхности данной конкретной конструкции. Обычно определяются времена распространения звука от каждого датчика до всех остальных датчиков, закрепленных на объекте исследования. Для этого после размещения датчиков возле каждого из них поочередно тем или иным способом генерируется акустический сигнал заданного спектра. По результатам калибровки составляется матрица времен распространения акустических волн [3].

Разумеется, не обязательно производить калибровку именно так, как это описано выше. Можно, например, генерировать калибровочные сигналы не только возле датчиков, но и посередине между ними, на пересечении диагоналей и т. д. Однако как отечественный, так и зарубежный опыт подсказывают,

что именно вышеописанная процедура является оптимальной. Главную роль здесь играют следующие три обстоятельства:

1. Доступ к произвольным точкам промышленного объекта, как правило, затруднен.

2. Пьезоэлектрические датчики позволяют не только принимать акустический сигнал, но могут его генерировать при подаче токового импульса. Поэтому при разработке новых алгоритмов необходимо рассчитывать на новое поколение аппаратуры, которое, возможно, позволит производить калибровку автоматически.

3. Процедура калибровки занимает достаточно много времени (в зависимости от сложности и доступности объекта и числа каналов тратится от 4 до 24 ч), поэтому едва ли имеет смысл без особой необходимости увеличивать объем подготовительных мероприятий.

Перейдем теперь к изложению основного содержания работы.

Скорость звука. Опыт подсказывает, что использование предположения о едином значении скорости звука в исследуемом объекте приводит к неверным результатам [3]. Поэтому было решено отказаться от применения понятия «скорость звука» в объекте тестирования и ввести понятие «поле времен распространения звуковых волн». (Это эквивалентно введению векторного поля скоростей распространения.) Таким образом обеспечивается наиболее общий подход к понятию скорости звука (скорости распространения волнового пакета по сложной и неоднородной поверхности), при котором время перемещения пакета между произвольными точками A и B $T(A, B)$ строго определено, индивидуально и может отличаться от $T(B, A)$.

Представление объекта. Вторым принципиальным шагом в предлагаемой методике определения координат явился отказ от физических координат (X, Y, Z) , измеряемых в метрах. Все вычисления производятся в «терминах» разности времен распространения с дальнейшей привязкой к некоторой, вообще говоря, достаточно условной развертке объекта на плоскость. К этой же развертке привязывается выбранная схема расположения датчиков. Таким образом, в конечном счете координаты дефектов определяются относительно датчиков, а не относительно геометрических особенностей аппаратов: люков, патрубков и т. п.

При таком подходе, во-первых, отпадает требование точного размещения датчиков на поверхности аппарата, во-вторых, удается в значительной мере абстрагироваться от реальной, подчас очень сложной геометрии аппарата.

На рис. 1 приведен пример, иллюстрирующий перечисленные выше положения: a и b — два разных объекта контроля, для которых координаты источников АЭ можно искать на одной и той же развертке на плоскость (c). Цифрами на рисунке обозначены датчики, крестиком — источник АЭ.

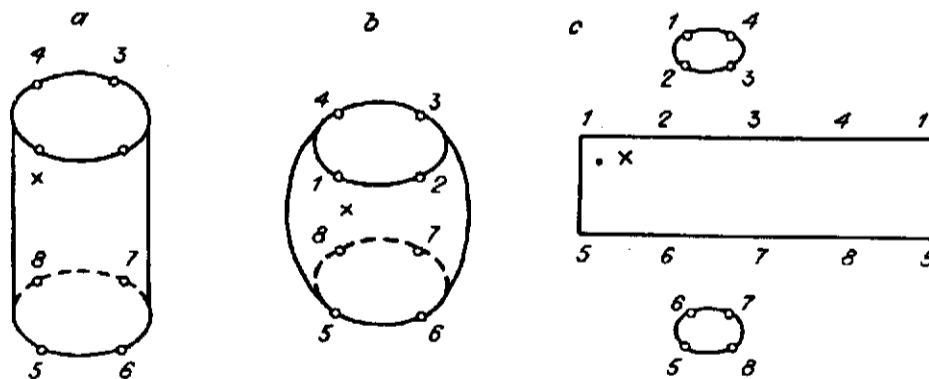


Рис. 1

Алгоритм определения координат источника сигнала АЭ. Наложим на развертку контролируемого объекта на плоскость некоторую дискретную сетку таким образом, чтобы датчики располагались в узлах сетки (рис. 2). Решение задачи (координаты источника сигнала) также будем искать в узлах этой сетки.

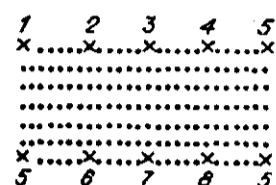


Рис. 2

Пусть акустический сигнал последовательно зафиксирован датчиками $D_i, D_j, D_k, \dots, D_l$ с абсолютными временами прихода $T_i, T_j, T_k, \dots, T_l$ соответственно. Разности времен прихода сигнала будут равны:

$$\begin{aligned} \Delta T_j &= T_j - T_i; \\ \Delta T_k &= T_k - T_i; \\ \dots & \\ \Delta T_l &= T_l - T_i. \end{aligned}$$

Рассмотрим подробнее первую разность времен прихода. С одной стороны, ΔT_j — это разность зафиксированных аппаратурой абсолютных времен прихода сигнала на i - и j -датчики, с другой стороны, ΔT_j равно следующей разности: времени распространения сигнала от точки излучения до j -датчика минус время распространения сигнала до i -датчика.

Допустим, что существуют матрица $K_i[n, m]$ времен распространения сигнала от каждой точки сетки (n, m) до датчика i и матрица $K_j[n, m]$ времен распространения сигнала от каждой точки сетки до датчика j . Рассмотрим выражение

$$D_j = (\text{Abs}(K_j[n, m] - K_i[n, m] - \Delta T_j)) < P,$$

где P — наперед заданная погрешность; Abs — абсолютное значение; индексы n, m пробегают все значения координатной сетки.

Легко понять, что D_j описывает некоторую область, точки которой могли бы служить источником сигнала, удовлетворяющего заданной разности времен прихода ΔT_j с заданной погрешностью P .

Запишем аналогичные выражения для оставшихся разностей времен прихода $\Delta T_k, \dots, \Delta T_l$

$$D_k = (\text{Abs}(K_k[n, m] - K_i[n, m] - \Delta T_k)) < P,$$

...

$$D_l = (\text{Abs}(K_l[n, m] - K_i[n, m] - \Delta T_l)) < P$$

и рассмотрим выражение $S = (D_j \wedge D_k \wedge \dots \wedge D_l)$, представляющее собой пересечение множеств точек, удовлетворяющих зафиксированному аппаратурой набору разностей времен приходов сигнала. По сути, S и есть решение задачи о нахождении координат источника сигнала акустической эмиссии.

С точки зрения вычислительной эффективности проще искать не пересечение нескольких множеств, а минимум функции

$$S_1 = \min_{n, m} (d),$$

где d — расстояние по Манхэттену (в отечественной литературе иногда используют термин «метрика городских кварталов») [4] между гиперповерхностью разностей времен прихода сигналов, полученной по калибровочным данным, и вектором разностей времен прихода, полученным в результате измерения. В данном случае

$$\begin{aligned}
d = & \text{Abs}(K_j [n, m] - K_i [n, m] - \Delta T_j) + \\
& + \text{Abs}(K_k [n, m] - K_i [n, m] - \Delta T_k) + \\
& \dots \\
& + \text{Abs}(K_l [n, m] - K_i [n, m] - \Delta T_l).
\end{aligned}$$

Отметим, что в случаях, когда решение задачи о нахождении координат источника сигнала отсутствует (т. е. при возникновении сбоев аппаратуры, при одновременной регистрации нескольких независимых сигналов АЭ и т. д.), пересечение множеств D_j, D_k, \dots, D_l , может быть, окажется пустым множеством, но $\min(d)$ тем не менее будет существовать, т. е. возможно получение ложных координат источника сигнала. Для борьбы с этим эффектом на практике можно применять несколько способов.

Самый простой и эффективный (хотя и не вполне достоверный) алгоритм основывается на проверке вычисленных координат источника на принадлежность некоторой окрестности датчика, зафиксировавшего сигнал первым.

Для отбраковки «ложных» источников сигнала акустической эмиссии более достоверен и теоретически более интересен алгоритм исследования формы поверхности S_1 . Исследования показали, что в окрестности истинного источника сигнала функция S_1 имеет достаточно крутой экстремум по всем направлениям (резко выраженный отрицательный пик) и, наоборот, для ложного источника акустического сигнала этот характерный экстремум отсутствует. Сложность заключается в реализации вычислительно-эффективного алгоритма обнаружения данного экстремума.

Обсуждение деталей. При решении задачи использовались некоторые предположения и упрощения. Важно понять, насколько их введение необходимо и какое влияние на решение задачи может оказать отказ от этих упрощений.

Интерполяция калибровочных данных. Было выдвинуто предположение, что для каждого датчика i имеется матрица $K_i [n, m]$ времен распространения сигнала от каждой точки сетки (n, m) до этого датчика. Естественно, что строить эти матрицы следует на основе калибровочных данных.

Напомним, что в процессе калибровки регистрируются данные о времени распространения сигнала от каждого датчика до всех остальных датчиков, а значит, и времена распространения сигнала от всех датчиков до некоторого выбранного датчика. Фактически для каждого датчика имеется двумерная функция времени распространения, значения которой определены в некоторых фиксированных узлах сетки. В дальнейшем необходимо интерполировать «гладким образом» данную функцию на все остальные точки сетки. Алгоритмы решения такой задачи в общем виде (при произвольных начальных условиях) авторам не известны. В процессе работы над описываемым алгоритмом задача интерполяции решена только для случаев равномерно-симметричных расположений датчиков на односвязных топологически замкнутых объектах, каковыми являются нефтехимические сосуды давления и емкости.

Может создаться впечатление, что требования к расположению датчиков при таком алгоритме поиска координат источника столь же жесткие, как и при антенном методе регистрации. Это не совсем так. Действительно, допустим, что некоторый датчик смещен относительно «требуемого» места. В этом случае при калибровке фиксируются времена, соответствующие его действительному месторасположению, затем они будут «гладким образом» интерполированы на равномерную сетку. Фактически координатная сетка в районе этого датчика станет неравномерной, но источник сигнала, если он встретится в окрестности смещенного датчика, останется привязанным к реальному расположению датчика. Абсурдная ситуация возникает и при отклонениях формы объекта от выбранной модели.

Выбор соотношения шага дискретной сетки и расстояния между датчиками. Поскольку решение ищется в узлах сетки с использованием алгоритма, исключающего «набегание» ошибки (так как алгоритм не является итерационным), очевидно, что точность вычисления координат дефекта определяется в основном шагом сетки. Решающее значение в вопросе точности определения координат источника АЭ имеет число узлов сетки, укладываемых между двумя соседними датчиками. Принципиальных ограничений здесь нет, поэтому количество узлов определяют исходя из следующих соображений.

С одной стороны, обычное расстояние между датчиками для металлических конструкций из «черных металлов» 3—4 м. «Удовлетворительной точностью» считается определение координат дефектов с погрешностью до 0,1—0,2 м. Соответственно между датчиками должно располагаться не менее 10—20 узлов сетки.

Задаче составляет около 300 Кбайт (150 Кслов). Легко подсчитать, что для 16 датчиков объем каждой матрицы не должен превышать $150/16 = 9,375$ Кслов, что соответствует матрице размерностью порядка 90×90 элементов. Видно, что при расположении датчиков, как это указано на рис. 3 (8 датчиков), число узлов сетки между соседними датчиками не должно превышать $50 (6 \times 50 \times 50 = 15 \text{ Кслов})$.

Для оценки точности результатов авторами проведен сравнительный анализ погрешности определения координат с использованием традиционного алгоритма для антенны в форме правильного треугольника ([2], с. 4) и погрешности предложенного метода. Результаты представлены на рис. 3. Сплошной линией изображена разность между истинным положением источника АЭ и координатами, вычисленными по «формуле треугольной антенны» в зависимости от процента ошибки в определении разностей времен прихода. Здесь же штриховой линией изображена аналогичная зависимость для описываемого метода (использован шаг сетки, при котором между двумя соседними датчиками размещается сорок узлов). Из рис. 3 видно, что в области больших погрешностей предлагаемый алгоритм работает значительно устойчивее.

Возможность работы в реальном времени. Под работой в реальном времени в задачах неразрушающего контроля методом акустической эмиссии понимается оперативное определение координат дефекта и степени его опасности прямо в процессе нагружения конструкции.

Поиск координат источника сигнала акустической эмиссии сводится к сложению (вычитанию) нескольких матриц и вычислению минимального значения матрицы. Если между соседними датчиками расположено N узлов сетки, то для вычисления координат по пяти сигналам (достаточно для практики) требуется приблизительно $K = (5 + 2)3 \times 4(N^2) = 84(N^2)$ операций. При $N = 20$ $K \leq 35\,000$. Характерное время регистрации группы сигналов АЭ (от одного источника) составляет 1 мс. Соответственно для работы в реальном времени требуется процессор со временем выполнения команды порядка $1 \text{ мс} / 35\,000 = 28 \text{ нс}$.

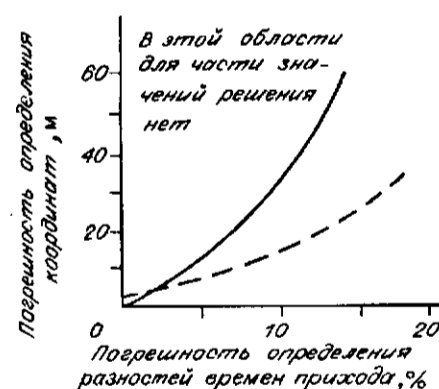


Рис. 3

Существующие персональные компьютеры общего назначения сами по себе не обеспечивают необходимого быстродействия. Поэтому в настоящее время описываемый метод реализован в виде отдельного пакета, применяемого после окончания нагружения объекта. Вместе с тем очевидно, что требуемым временным характеристикам удовлетворяет практически любой современный матричный (векторный) процессор. Использование матричного процессора, встраиваемого в персональный компьютер в виде отдельной платы, позволит создать достаточно гибкую систему АЭ-контроля, работающую в реальном времени.

Заключение. Для контроля сосудов давления со сложной формой поверхности разработан метод определения координат источника сигнала акустической эмиссии.

К достоинствам данного метода (по сравнению с методами, использующимися в настоящее время) можно отнести следующие:

— отказ от единой модели скорости звука в пределах тестируемого объекта, позволяющий автоматически учитывать неоднородности материала объекта (люки, врезки из другого металла и т. п.), что достигается за счет гладкой интерполяции калибровочных значений времен распространения звуковых волн (от каждого датчика до всех остальных) на равномерную сетку, накладываемую на плоскостную развертку объекта;

— большая устойчивость предложенного метода относительно погрешностей регистрации (сбои и наводки в каналах регистрации, наложение сигналов);

— алгоритм вычисления координат дефекта, сводящийся к сложению (вычитанию) нескольких матриц, может быть эффективно реализован при помощи практически любого существующего матричного (векторного) сопроцессора, встраиваемого в персональный компьютер. Таким образом, при относительно небольших затратах можно вычислять координаты дефектов в реальном времени.

К настоящему времени алгоритмы реализованы в виде отдельного вычислительного пакета на персональном компьютере IBM PC. Это программное обеспечение было успешно использовано для обработки результатов испытаний более 200 нефтехимических сосудов давления и емкостей.

Созданный алгоритм может быть взят за основу при проектировании нового поколения аппаратуры неразрушающего контроля методом акустической эмиссии.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность д-ру техн. наук А. Н. Касперовичу за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакар К. Б. и др. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике. — М.: Атомиздат, 1980.
2. Красильников Д. П., Шемякин В. В. Некоторые типы конфигураций приемных антенн и методы локализации источников в задаче акустико-эмиссионного контроля конструкций. — М., 1981. — (Препр. /ИАЭ).
3. Washchies E., Gries H. et al. Grundlagen fortschrittliche Mess und Geratekonzepte sowie Ergebnisse der Schallemissionsprüfung. — Grundlagen: Fortschrittliche Mess- und Geratekonzepte sowie Ergebnisse der SEP, 1977.
4. Фор А. Восприятие и распознавание образов /Под ред. Г. П. Катуса. — М.: Машиностроение, 1989.

Поступило в редакцию 8 июня 1993 г.