

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Мурая Елена Николаевна

*К.т.н., доцент, Дальневосточный государственный
университет путей сообщения
elena_muray22@mail.ru*

CALCULATION OF THE COORDINATE OF PULSED SOURCES ACOUSTIC EMISSIONS

E. Muraya

Summary. The fragile destruction of technical and natural objects is not uncommon at present. The consequences of the accidents that occur can be accompanied by significant financial, material and environmental losses. Therefore, the problem of preventing sudden destruction of technical objects and structures is very relevant. The purpose of the work: to obtain analytical solutions to the problem of calculating the coordinates of acoustic emission sources and their analysis and development of algorithms for computer programs for identifying foci of microfractures of solids; Their visualization and evaluation of parameters. The article also considers the theory of acoustic emission defects. The above problems were solved with the help of theoretical and experimental methods of solid-state acoustics, mathematical and computer modeling. It is shown that the linearization of the system of measurement equations makes it possible in many cases to find an analytical solution of the location problem. The presence of an analytical solution allows us to calculate the location errors associated with inaccuracies in the measurement of time delays and the positioning of the PP.

Keywords: acoustic properties, acoustic emission, impulse, non-destructive testing, mathematical modeling, computer modeling, piezoelectric converters.

Аннотация. Хрупкие разрушения технических и природных объектов в настоящее время не являются редкостью. Последствия от произошедших при этом аварий могут сопровождаться значительными финансовыми, материальными и экологическими потерями. Поэтому проблема предотвращения внезапных разрушений технических объектов и сооружений весьма актуальна. Цель работы: получение аналитических решений задачи расчета координат источников акустической эмиссии и их анализ и разработка алгоритмов компьютерных программ для выделения очагов микро-разрушений твердых тел; их визуализация и оценка параметров. В статье так же рассмотрена теория дефектов акустической эмиссии. Приведенные задачи решались с помощью теоретических и экспериментальных методов акустики твердого тела, математического и компьютерного моделирования. Показано, что линеаризация системы уравнений измерений позволяет во многих случаях найти аналитическое решение задачи локации. Наличие аналитического решения позволяет рассчитать погрешности локации, связанные с неточностями измерения задержек времени и позиционирования пьезопреобразователей.

Ключевые слова: акустические свойства, акустическая эмиссия, импульс, неразрушающий контроль, математическое моделирование, компьютерное моделирование, пьезопреобразователи.

Для автоматизации (ускорения) расчётов и устранения чисто арифметических ошибок необходимо использовать вычислительную технику. Здесь имеются в виду персональные компьютеры (ПК), которые стали общедоступными, ими оснащаются многие современные приборы.

Довольно распространённый в недавнем времени подход к использованию ПК заключался в разработке и применении программ реализации необходимых преобразований и алгоритмов на языках программирования высокого уровня (Фортран, Паскаль, Си и т.п.). Такой подход возможен, но он крайне не эффективен в силу трудоёмкости написания и отладки программ. На сегодняшний день современные системы компьютерной математики (СКМ), в которые изначально уже встроена реализация основных шагов алгоритмов, пригодных для акустической локации. В этих системах реализованы языки программирования сверхвысокого

уровня, когда всего несколькими командами решается необходимая задача. В этих условиях громоздкость аналитических решений уходит на второй план. Реализация алгоритма сводится к подстановке конкретных данных в полученное системой решение. Основными критериями приемлемости решений являются: быстродействие алгоритма (для оперативной локации источников), однозначность решений и чувствительность к ошибкам исходных данных.

Так как скорость обработки алгоритма зависит от ресурсов вычислительной системы, то далее, при оценках этой скорости приводятся тип и тактовая частота центрального процессора (CPU), а также объём оперативной памяти (RAM).

С целью упрощения математических выкладок принимаются предположения и следующие допущения:

1. Контролируемый объект отнесен к определенной глобальной декартовой системе координат. Во избежание оперирования большими числами и в целях упрощения математической модели задачи локации будем решить в некоторой декартовой системе координат, специально выбирая ее начало и ориентацию осей. Начало координат будем размещать в точке установки первого пьезопреобразователя (ПП), таким образом, чтобы его координаты были нулевыми. Остальные оси будем, по возможности, ориентировать главным образом вдоль расположения других ПП. Это позволит обнулить некоторые параметры математической модели и упростить уравнения измерений. В то же время пересчет найденных локальных координат АЭ-источников в глобальные — достаточно тривиален.

2. Поскольку очередность прихода сигналов на ПП может быть различной (в зависимости от положения источника), для решения задачи локации необходим предварительный анализ этой очередности и соответствующие коррективы алгоритма (программы) решения. Чтобы исключить эти операции и сделать алгоритм единообразным, будем вводить корректировку задержек времени таким образом, что бы нулевую задержку всегда имел первый ПП.

3. Установка ПП часто лимитируется отсутствием доступа к желаемым местам их размещения. Типичный случай — доступность только одних наружных (боковые) поверхностей объекта для размещения ПП. В этих условиях можно организовать лишь некоторый частный вид антенны с определенными элементами симметрии. Источники АЭ находятся при этом вне конфигурации антенны («боковая» локация). Возможны также случаи «двухслойных» антенн, когда их части находятся на двух разных поверхностях (плоскости). Все это также вносит определенные упрощения в математическую модель задачи. Поскольку (как будет показано далее), аналитическое решение пространственной задачи в общей постановке (произвольном расположении ПП) проблематично, то эти частные случаи представляют практический интерес. Кроме того, указанные ограничения определенным образом сужают регионы возможных расположенной АЭ-источников, что позволяет иногда разрешить проблему двойственности решений задач локации. Расположение ПП на поверхности объекта означает, что источники АЭ могут находиться только внутри объекта, а источники, симметричные относительно этой поверхности, физически не существуют.

4. Если выполнена предварительная акустическая аттестация (калибровка) контролируемого объекта, то скорость звука становится известной, а это уменьшает на единицу число подлежащих определению величин.

Алгоритмы решения задач локации АЭ-источников основаны, как правило, на формулах (уравнениях измерений), связывающих измеряемые величины и параметры позиционирования источника АЭ. Эти формулы в общем случае имеют *неявный* вид и достаточно громоздки. Процесс преобразования исходных соотношений к явным зависимостям также достаточно сложен (1).

Попытки прямого решения пространственной задачи локации в общей постановке к положительному результату не приводят, т.к. вследствие нелинейности исходных уравнений проявляется неоднозначность радикалов. Исходная система уравнений задачи для пяти ПП примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 - (r + vt_2)^2 = 0 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 - (r + vt_3)^2 = 0 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 - (r + vt_4)^2 = 0 \\ (x - x_5)^2 + (y - y_5)^2 + (z - z_5)^2 - (r + vt_5)^2 = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

Антенна состоит из пяти ПП с произвольным расположением. Начало локальной системы декартовых координат совмещено с первым преобразователем, ось z направлена вертикально вверх. Источник сигнала имеет координаты x, y, z . Измеряются временные задержки t_2, t_3, t_4, t_5 .

В результате попытки аналитического решения системы (1) был выдан пустой результат. Для обхода этой трудности рассмотрим такие способы как:

- 1) линеаризация системы уравнений измерений;
- 2) использование результатов акустической аттестации объекта.

Реализуем выше предложенный алгоритм на основе модельных данных (табл. 1). Рассмотрим плоскую антенну, имеющую пять произвольно расположенных ПП.

В таблице принято: x_i, y_i — декартовы координаты i -го ПП; r_i — расстояние от источника АЭ до i -го ПП,

Таблица 1. Исходные данные для модельной задачи

	Источник (имитатор)	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	П5
$x_i, \text{м}$	4	0	5	2	8	10
$y_i, \text{м}$	3	0	0	5	8	4
$r_i, \text{м}$		5	3.16228	2.828427	6.40312	
$T_i, \text{мкс}$		1000	632.4555	585.6854	1280.62	1216.55
$t_i, \text{мкс}$		0	-367.644	-434.314	280.6248	216.553

T_i — момент времени прихода сигнала к i -му ПП; t_i — задержка времени прихода сигнала к i -му ПП.

Значения T_i соответствуют скорости распространения сигнала -5000 м/с.

Подставляя данные таблицы в формулу (1) и реализуя технологию решения с применением функции прикладных программ, получаем следующие результаты:

$$\begin{aligned} x &= 3.999664234; & v &= 5015.113618; \\ y &= 2.998925819; & r &= -4.988711972; \\ r &= 4.988711972; & v &= -5015.113618. \end{aligned}$$

Отрицательные значения для v и r , получаемые при этом отбрасываем, как не имеющие физического смысла. Расчетные значения для координат источника (x, y) , его расстояния r до первого ПП и скорости v отличаются от действительных (табл. 1) менее чем на процент. В реальной ситуации (при обработке фактических данных) погрешности могут быть существенно выше вследствие наличия различных составляющих погрешностей, возникающих при измерении параметров T_i или t_i .

Для определения координат источника АЭ, в общем случае, необходимо минимум три пьезопреобразователя (ПП). Однако и при этом возникает неопределенность. Действительно, используя три ПП, можно построить две гиперболы, в фокусах которых расположены приемники. Пересечение гипербол дает положения источника (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что точек пересечения две: одна внутри «треугольников» приемников, другая — вне. Таким образом, при работе с тремя ПП возможно однозначное определение координат источника, если он находится внутри области расположения ПП.

Для устранения этой неоднозначности рассмотрим некоторые антенны специальной конфигурации (рис. 2), применяемые для решения плоских задач локации, характерных для тонкостенных объектов (трубопроводы, сосуды давления и др.).

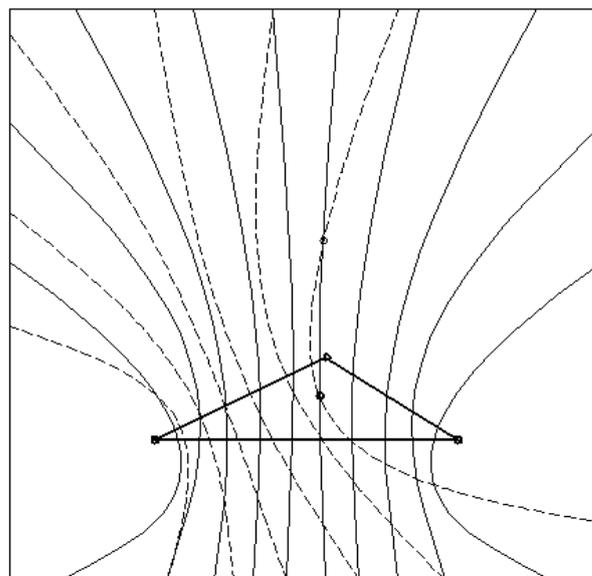


Рис. 1. Иллюстрация неоднозначности определения координат источника АЭ из трех приемников

Задача 1. Плоская задача: L — образная антенна из четырёх ПП (рис. 2, а).

Задача 2 — это задача 1, но 5 ПП (рис. 2, б).

Данные задачи можно использовать для акустической аттестации объекта по скорости распространения сигнала. На практике также достаточно часто применяются антенны ПП, имеющие определенную симметрию. Рассмотрим несколько таких антенн (2).

Задача 3. Плоская задача, антенна из трех ПП в виде равностороннего треугольника со стороной a (рис. 2, в).

Замечание: Составляющие уравнений измерений, в зависимости от расположения ПП могут меняться.

Задача 4. Плоская задача с антенной из четырех ПП в виде централизованного равностороннего треугольного со стороной a (рис 2, г).

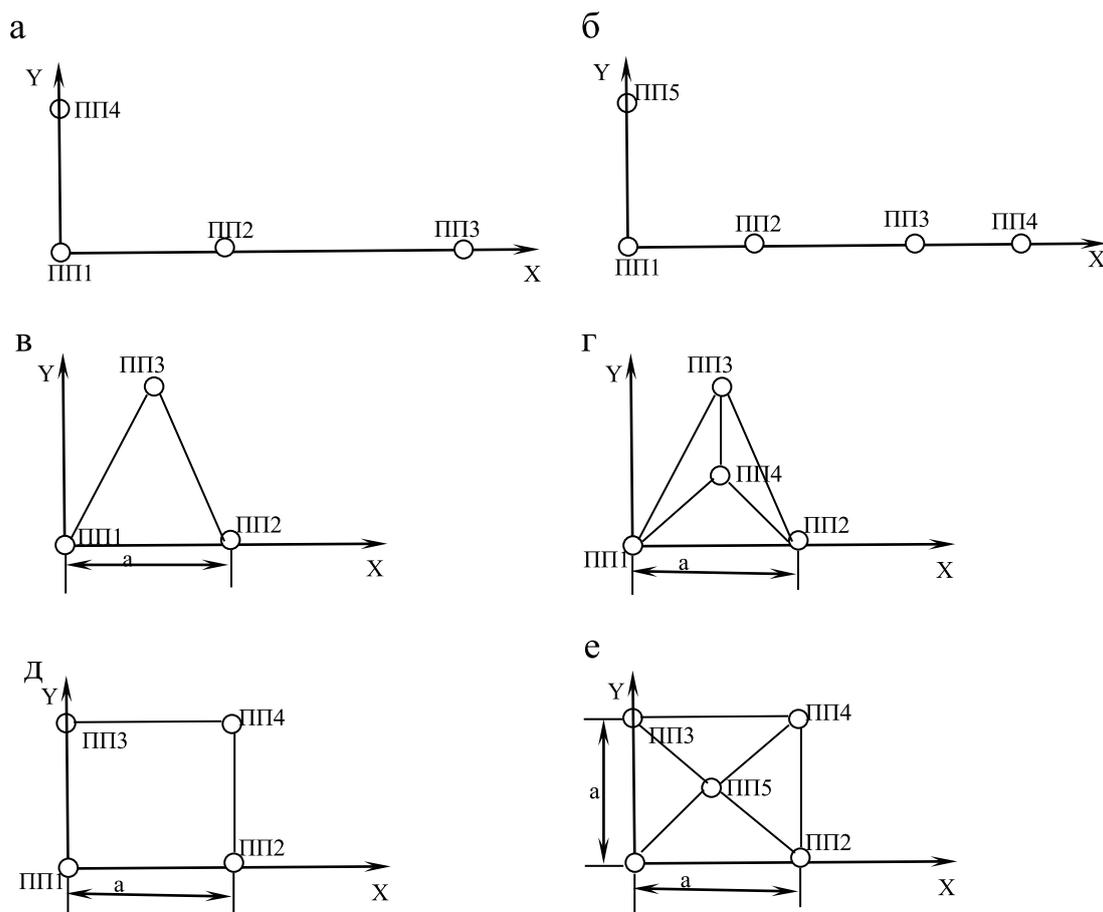


Рис 2. Схемы упорядоченных антенн

Задача 5. Плоская задача с антенной из четырех ПП в виде квадрата со стороной a (рис. 2 д).

Задача 6. Плоская задача с антенной из пяти ПП в виде центрированного квадрата со стороной a (рис. 2 е).

При решении выше предложенных задач в использовалась разработанная процедура **loc** — расчёт координат источников АЭ.

Синтаксис:

`loc2(M, k);`

Параметры:

M — матрица; k — рациональное число.

Описание:

Процедура «рассчитывает» координаты источников АЭ в плоской задаче для антенны из пяти произвольно расположенных преобразователей и так же определяет некоторые дополнительные параметры источников (см. ниже).

Матрица M должна иметь 11 столбцов, в которых располагаются:

- ◆ порядковые номера записей;
- ◆ задержки времени (5 столбцов);
- ◆ амплитуды сигналов (5 столбцов).

Параметр k задаёт коэффициент затухания сигналов (формат float).

Процедура «возвращает» матрицу с шестью столбцами:

- ◆ порядковый номер записи;
- ◆ координата x источника;
- ◆ координата y источника;
- ◆ дистанция r источника от первого ПП;
- ◆ скорость v распространения сигналов;
- ◆ энергия E источника сигнала.

Процедура применима только для плоских задач.

Рассматривая упорядоченные антенны, можно сделать вывод, что четырехточечная схема локации по сравнению с трехточечной дает повышенную помехо-

устойчивость, и при этом обеспечивает гибкое размещение ПП при контроле больших поверхностей сложных конфигураций.

На основании результатов рассмотренных примеров и задач, можно сделать следующие выводы. В ряде задач, в исходную (нелинейную) систему уравнений измерений ордината y источника АЭ в силу особенностей принятой локальной системы координат входит только в виде слагаемого y^2 . При этом неоднозначность вследствие изменения знака y исчезает. Для плоских задач с линейной антенной эта неоднозначность физически связана с возможностью существования двух источников АЭ, расположенных симметрично относительно оси X , т.е. с одинаковыми абсциссами x , но ординатами y противоположного знака. Выбор единственного решения в некоторых случаях возможен на основе физических соображений. Ликвидировать указанную двузначность также можно путем увеличения числа ПП в антенне с нарушением их симметричного расположения (задачи 4–6).

Линеаризация уравнений измерений приводит к устранению из них слагаемого y^2 и ликвидации указан-

ной двузначности. Однако при этом число уравнений уменьшается на единицу, поэтому для нахождения всех искомым неизвестных в исходной нелинейной системе (1) необходимо иметь одно избыточное уравнение сверх минимально необходимого их числа или знать значение скорости распространения сигнала v , предварительно определив ее путем акустической аттестации объекта контроля.

В линеаризованных системах уравнений измерений имеются члены, содержащие в виде сомножителей выражения r^1 , v и v^2 , для которых двузначность отсутствует (т.к. нет смысла в отрицательной скорости звука или отрицательном расстоянии).

Таким образом, линеаризация системы уравнений измерений позволяет во многих случаях найти аналитическое решение задачи локации (3). При отсутствии ошибок исходных данных погрешности локации не превышают 0,01%. Наличие аналитического решения позволяет рассчитать погрешности локации, связанные с неточностями измерения задержек времени и позиционирования ПП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробот Ю. Б., Романова Е. Н. Сравнение двух методов локации источников акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2005. — № 9. — С. 23–25.
2. Мурая Е. Н. Моделирование процессов распространения упругих волн в различных волноводах // Научный журнал. — 2016. — № 4(5) — С. 5–9.
3. Система акустической аттестации объектов контроля для проведения акустико-эмиссионной диагностики // Бюллетень научных сообщений № 21: сб. науч. тр. / ДВГУПС. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. — С. 77–81

© Мурая Елена Николаевна (elena_muray22@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Дальневосточный государственный университет путей сообщения