

Краткие сообщения

08

Фрактальные свойства акустических локационных откликов

© И.Б. Аксенов

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева (КАИ)

420111 Казань, Россия

e-mail: aksekov@cs5.kstu-kai.ru

(Поступило в Редакцию 4 августа 2003 г. В окончательной редакции 19 июля 2004 г.)

Анализируется фрактальная размерность отраженных ультразвуковых сигналов в образцах стальных пластин с имитацией дефектов. Показана зависимость величины фрактальной размерности от размеров дефекта. Оценены разрешающая способность и пригодность метода оценки фрактальной размерности акустических локационных откликов для практической дефектоскопии.

Ультразвуковая дефектоскопия является признанным методом диагностики и контроля материалов. В [1] констатируется, что ультразвуковой контроль развивается по сложившимся направлениям и вышел на такую стадию, когда новые методы измерения сводятся к усовершенствованию существующих. Классификация свойств неодородных поверхностей по фрактальной размерности [2] позволяет предположить наличие фрактальных свойств отражающих границ неодородностей и дефектов в локационных откликах и и применить их для практической дефектоскопии. В [3] приведены результаты экспериментального исследования акустических откликов шероховатых поверхностей цилиндрических труб, образованных коррозией, и выявлено, что в зависимости от величины шероховатости меняется фрактальная размерность акустических откликов. Для гладких поверхностей оценка нижней границы хаусдорфовой размерности акустического отклика $D_2 \approx 2$, при изменении шероховатости в пределах 0.2...6 mm оценка D_2 составляет 1.85...0.6. Следует отметить, что в экспериментальных образцах с $D_2 \approx 0.6$ толщина коррозионных образований значительно превышала толщину стенок трубы.

В настоящей работе приводятся результаты фрактального анализа ультразвуковых локационных откликов, полученные при ультразвуковой дефектоскопии стандартного образца типа СО-2 с имитационными дефектами в виде сквозных отверстий с датчиками двух типов.

В общем случае дефект имеет отражающую поверхность в виде суперпозиции гладких относительно крупномасштабных неровностей (от 5...10 длин волн) и мелкомасштабных слабшероховатых неодородностей, размеры которых существенно меньше длины волны. Локационный отклик содержит зондирующий сигнал, отраженные сигналы от дефекта и стенок контролируемого объекта, помеху с гауссовой статистикой и т.д. По массивам данных локационных откликов была выполнена оценка нижней границы размерности Хаусдорфа–Безиковича.

На рис. 1 приведены оценки фрактальной размерности первой серии локационных откликов с имитационными дефектами 1.5 и 5 mm. Скорость распространения ультразвуковых волн в образце 3200 [m/s]. Рассчитанная методом корреляционного интеграла [4] оценка нижней границы фрактальной размерности составила для бездефектного образца $D_2 = 1.37$, для имитационного дефекта диаметром 1.5 mm $D_2 = 0.44$, для имитационного дефекта диаметром 5 mm $D_2 = 0.3$.

С целью уточнения границ применения и оценки разрешающей способности предложенного подхода было проведено исследование серии дополнительных измерений с датчиком типа „Молдавия“ на аналогичных образцах. Размеры имитационных дефектов менялись в пределах от 0.5 до 5 mm. Скорость распространения звуковых волн 6000 m/s.

На рис. 2 приведен обобщенный график сравнительных оценок фрактальной размерности локационных откликов имитационных дефектов с дискретным ша-

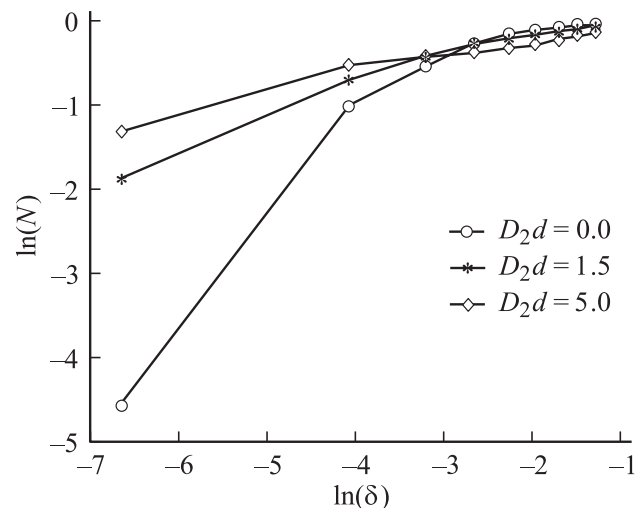


Рис. 1. Оценка фрактальной размерности акустических экспериментальных образцов 1-й серии измерений.

Таблица 1.

Размер дефекта	Оценка D_2
0.0	1.47
1.0	1.36
2.0	0.84
3.0	0.52
4.0	0.32
5.0	0.19

гом 1 mm. Цифры на графике соответствуют размерам дефекта в mm. Таким образом, подтверждается общая тенденция к снижению размерности Хаусдорфа по мере увеличения размеров дефекта. Оценки размерности Хаусдорфа приведены в табл. 1.

Появление дополнительных отражающих границ в резонаторе в связи с наличием дефекта изменяет в нем число возможных резонансов, что и обнаруживается в локационном отклике при широкополосном возбуждении резонатора. Спектры мощности локационных откликов дефектных образцов выявляют появление дополнительных спектральных составляющих, но не позволяют непосредственно оценить размеры дефекта (рис. 3).

Возможность применения в практической дефектоскопии оценки D_2 фрактальной размерности, которая называется также корреляционной размерностью, обосновывается наличием степенной зависимости спектра мощности от фрактальной размерности вида $S(f) \approx k/f^\beta$ [2,4]. Показатель степени дает однозначную связь величины неоднородности с показателем степени закона изменения спектра мощности в отличие от фурье-оценки спектра мощности, дающей общее изменение спектрального состава локационного отклика.

Общее число возбужденных мод в однородных резонаторах с гладкими границами пропорционально отношению характерного размера резонатора (объема, площади) соответственно кубу и квадрату длины волны максимальной частоты, возбужденной в резонаторе [5]. Поправочные члены для оценки числа возбужденных мод при наличии фрактальных границ содержат частотные множители в меньших степенях. Приращение числа резонансов при наличии фрактальных границ в резонаторе оценивается формулой, предложенной М.В. Берри,

$$|\Delta N(f)| = \left(L \frac{f}{c} \right)^D, \quad (1)$$

где ΔN — приращение числа резонансов, L — характерный размер длины, f — частота, c — скорость звука, D — фрактальная размерность.

Поскольку отношение f/c представляет собой величину, обратную длине волны максимальной частоты, возбужденной в резонаторе, то оценка разрешающей способности метода фактически определяется соотношением характерного размера дефекта и длины волны,

возбужденной в резонаторе. Последнее соотношение может быть переписано в виде

$$D = \frac{\ln(\Delta N(f))}{\ln(L/\lambda)}, \quad (2)$$

где L — характерный размер длины дефекта; λ — длина волны максимальной частоты, возбужденной в резонаторе.

Записанное соотношение очень близко к определению размерности Хаусдорфа–Безиковича, которое формально записывается как предел отношения логарифма числа N гиперсфер, покрывающих кривую, к логарифму

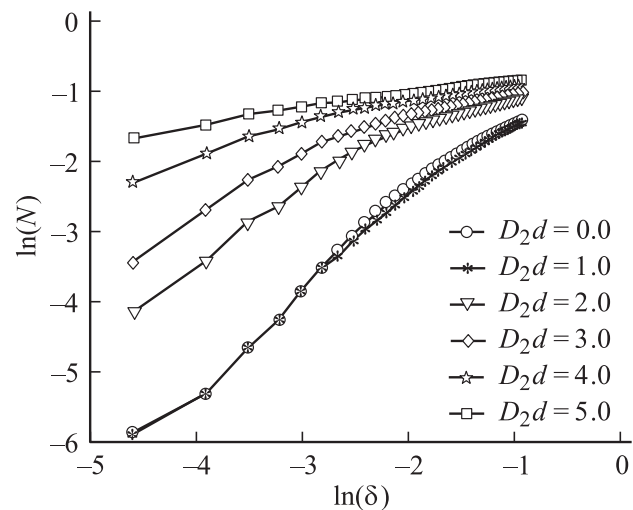


Рис. 2. Оценка фрактальной размерности акустических экспериментальных образцов 2-й серии измерений.

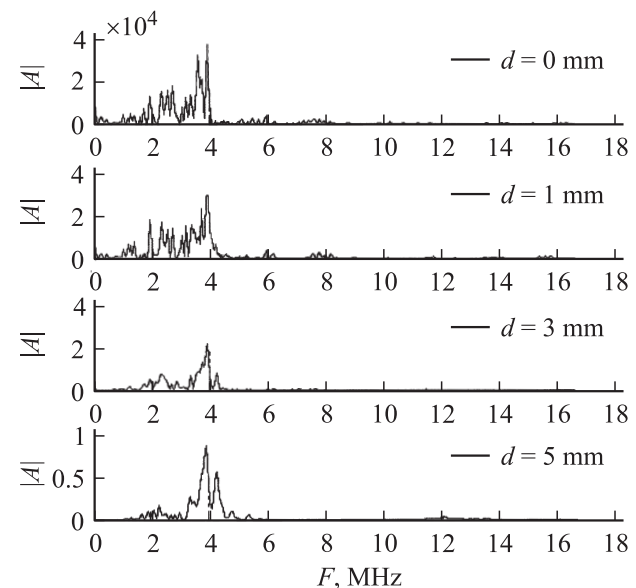


Рис. 3. Спектр мощности локационных откликов образцов с различными размерами дефекта 0–5 mm.

Таблица 2.

Размер дефекта	Оценка D_2
0.5	1.45–1.5
1.0	1.34–1.47
1.5	0.96–1.2
2.0	0.7–1.13
2.5	0.6–0.96
3.0	0.5–0.54
3.5	0.29–0.52
4.0	0.24–0.31
4.5	0.21–0.33
5.0	0.2–0.22

обратной величины диаметра δ гиперсферы

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\delta))}{\ln(1/\delta)}. \quad (3)$$

Такой формализм позволяет предложить физическую интерпретацию фрактальной размерности для акустических локационных откликов как отношение логарифма числа возбужденных колебаний в резонаторе к логарифму обратной длины волны максимальной частоты возбуждающих колебаний

$$D_a \approx \frac{\ln(\Delta N(1/\lambda))}{\ln(1/\lambda)}. \quad (4)$$

Во второй серии экспериментов минимальная длина волны при максимальной частоте заполнения зондирующего импульса ≈ 3 MHz составляет 0.5 mm, приращение периметра дефекта также равно 0.5 mm. Оценка D_2 нижней границы фрактальной размерности выполнена с применением корреляционного интеграла. Ниже приведена сводная таблица оценок размерности Хаусдорфа при изменении наклона оси датчика на 5° (табл. 2).

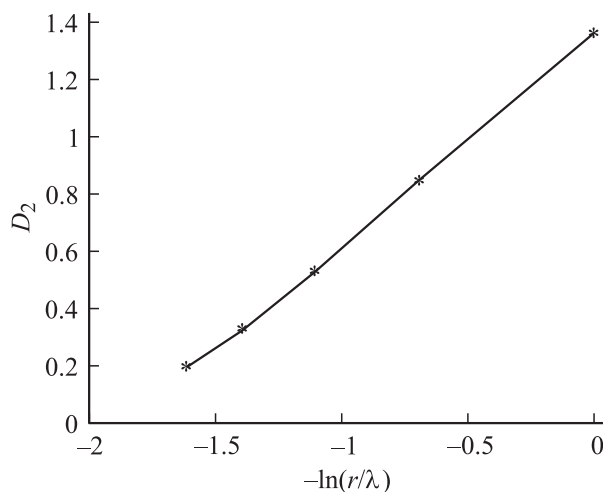


Рис. 4. Зависимость оценки фрактальной размерности от относительного логарифмического размера дефекта.

Как это следует из экспериментальных результатов, практическая разрешающая способность оказывается вдвое меньшей величиной.

На рис. 4 приведен график зависимости оценки D_2 от обратного логарифма относительного размера дефекта, иллюстрирующий практически линейную зависимость. Необходимый диапазон измерений для целей практической дефектоскопии достигается изменением частотного заполнения зондирующих импульсов.

В заключение следует отметить, что предложенный метод ориентирован на аппаратную реализацию недорогих диагностических тестеров для дефектоскопии и мониторинга элементов конструкций, в процессе эксплуатации которых возможно изменение свойств материалов (появление усталостных трещин, коррозии и т.п.). Аппаратное вычисление корреляционного интеграла сводится к вычислению сумм вида [5]

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{ij} H(r - |x_i - x_j|),$$

где H — функция Хевисайда, принимающая единичное значение при попадании пары отсчетов локационного отклика, отображающих фазовое пространство в ячейку размером r и нулевое значение в остальных случаях.

При реальном числе отсчетов $N \approx 400 \dots 500$ аппаратное вычисление таких сумм устройствами на основе PIC-контроллеров и специализированных ПЛИС (программируемых логических интегральных схем) не представляет больших технических трудностей.

Список литературы

- [1] Ермолов И.Н. Дефектоскопия, 2003. № 2.
- [2] Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
- [3] Аксенов И.Б., Тукмаков А.Л. // Электронное приборостроение: Научно-практический сборник. 2001. Вып. 4 (20).
- [4] Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.
- [5] Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.