

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Д. Н. БАЗЫЛЕВ¹, В. А. РОМАНОВИЧ², С. Н. СОМОВ¹, А. А. ПЫРКИН¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: org@mail.ifmo.ru

²АО „Диаконт“, 195274, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена задача диагностирования трубопроводов с использованием фазированной антенной решетки (ФАР) на электромагнитно-акустическом преобразователе (ЭМАП). Предложен алгоритм работы фазированных решеток на ЭМАП, обеспечивающий улучшенные точностные характеристики и более высокую скорость сканирования объекта контроля по сравнению с классическим методом диагностики с ФАР. Работоспособность и эффективность разработанного алгоритма сканирования исследованы экспериментально с помощью макета ЭМАП-ФАР и контрольного образца. Результаты экспериментов демонстрируют, что предложенный алгоритм позволяет существенно снизить влияние перекрестных помех и повысить отношение сигнал/шум в распределениях амплитуд эхосигналов по сравнению с классическим алгоритмом.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, ультразвуковая диагностика, неразрушающий контроль, электромагнитно-акустический преобразователь

Введение. Стальные трубопроводы широко используются в нефтегазодобывающей и нефтегазотранспортной отрасли, а также в коммунальном хозяйстве. Для снижения уровня аварийности в целях своевременного проведения ремонтных работ необходимо диагностировать износ металла и сварных соединений трубопроводов. При выявлении дефектов (механических повреждений, дефектов при сварке, коррозии) трубопроводов используются физические методы и средства неразрушающего контроля (НК) металлоизделий [1—5]. С целью ультразвукового (УЗ) НК широко применяются роботы-дефектоскопы с фазированными антенными решетками (ФАР), которые используют классические УЗ-пьезопреобразователи. Однако диагностирование с помощью таких ФАР требует подготовки рабочей поверхности трубы (зачистки) и непосредственного контакта с ней, кроме того, стоимость датчика высока.

Одним из наиболее перспективных является акустический метод контроля, использующий электромагнитно-акустическое преобразование (ЭМАП). Этот метод характеризуется бесконтактным возбуждением и приемом УЗ-волн. Для ультразвукового контроля применяются сдвиговые нормальные волны (SH-волны) — поперечные волны с горизонтальной поляризацией [6], поперечные волны с вертикальной поляризацией (SV) и волны с вертикальной поляризацией (волны Лэмба) [7, 8]. Основными достоинствами волн Лэмба являются возможность их генерации при помощи ЭМАП и хорошо разработанный математический аппарат, используемый для расчетов акустических полей. Сильное затухание волн Лэмба при контакте пластины с твердой или жидкой средой на практике приводит к невозможности проведения контроля без предварительной очистки труб.

SH-волнам свойственны все достоинства волн Лэмба и при этом они нечувствительны к наличию загрязнений на поверхности трубы. Однако генерация SH-волн при помощи ЭМАП требует создания сложных многополюсных магнитных систем и катушек со сложной топологией.

В настоящей работе для диагностирования состояния металла применяются SV-волны, которые обладают схожими с SH-волнами достоинствами и при этом не требуют сложной топологии ФАР.

Алгоритм работы датчика ЭМАП-ФАР. Конструктивно ФАР представляет собой набор точечных источников, которые возбуждают и принимают сигналы с заданным запаздыванием относительно соседнего источника. В зависимости от величины запаздывания изменяется угол фокусировки УЗ-пучка (от всех источников). Для возбуждения наклонного пучка с помощью ЭМАП используется SV-волна, имеющая поперечно-вертикальную поляризацию. При плотности среды ρ скорость распространения данного типа волн [9]:

$$C = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (1)$$

где E — модуль нормальной упругости, ν — коэффициент Пуассона.

Такой подход, в отличие от пьезопреобразования, позволяет возбуждать УЗ-волны на некотором удалении от поверхности проводника.

SV-волны при угле падения более 30° отражаются от поверхностей не по законам геометрической оптики, а по усложненным траекториям. В настоящей работе с целью упрощения рассмотрен принцип работы с ЭМАП-ФАР для объекта контроля в полупространстве. Данное допущение позволяет не учитывать отражения волн от границы объекта контроля.

Визуализация с помощью классической ФАР. При использовании классического метода сканирования объекта контроля с применением ЭМАП-ФАР ультразвуковой пучок создается всеми элементами ФАР [10—12]. Фокусировка на угол α и прием эхосигналов осуществляются с помощью временных запаздываний dt_i , которые рассчитываются для генераторов и приемников следующим образом:

$$dt_i = \frac{10^3 dr_i}{c_t}, \quad (2)$$

$$dr_i = \sqrt{(x + (N-1)d)^2 + h^2} - \sqrt{(x + (i-1)d)^2 + h^2}, \quad (3)$$

$$x = htg(\alpha) - \left(\frac{N}{2} - 0,5\right)d, \quad (4)$$

где n — число элементов ФАР; d — расстояние между элементами; h — глубина фокусировки; α — угол фокусировки генераторов или приемника; dr_i — расстояние от i -го элемента до окружности радиуса $\sqrt{(x + nd)^2 + h^2}$ с центром в точке фокусировки; c_t — скорость распространения поперечной волны.

Сканирующий пучок формируется с помощью запаздываний на генераторах, после чего происходят прием эхосигналов в каждом канале приемника, смещение на заданное запаздывание dt_i и суммирование для создания А-скана. Существенный недостаток классической реализации ФАР заключается в том, что для получения распределения амплитуд эхосигналов с высокой точностью (разрешением) требуется большое количество зондирований, что приводит к увеличению времени работы дефектоскопа.

Визуализация с помощью цифровой ФАР. При помощи предложенного цифрового алгоритма работы ЭМАП-ФАР зондирование объекта контроля осуществляется каждым элементом ФАР по очереди. Таким образом, число операций сканирования равно числу элементов, что позволяет уменьшить время работы устройства. В результате зондирования и приема эхосигналов получается набор сигналов от всех возможных пар элементов (генератор—приемник).

Определим общее число реализаций принятых эхосигналов:

$$N = n(n - 1). \quad (5)$$

Обработка считанных эхосигналов от всех возможных реализаций N происходит следующим образом. Вначале рассчитывается суммарный эхосигнал для каждой точки получаемого результата сканирования. Эта операция позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум и, как следствие, повысить точность определения положения и размеров выявляемых дефектов. Для точки A с координатами x и y суммарный эхосигнал определяется в виде

$$U(x, y) = \sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n U_{s,r}(t_{s,r}), \quad (6)$$

где $U_{s,r}$ — пришедший из точки $A(x, z)$ эхосигнал; $t_{s,r}$ — время распространения УЗ-волны по кратчайшему пути от генерирующего элемента ФАР s до точки $A(x, z)$ и обратно до приемного элемента ФАР r :

$$t_{s,r} = \frac{\sqrt{(x + x_s)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_r)^2 + z^2}}{C}, \quad (7)$$

где C — скорость распространения УЗ-волн в материале объекта контроля; x_s, x_r — координаты генерирующего и приемного элементов ФАР.

Далее определим амплитуду суммарного эхосигнала для каждой точки. Применим фильтрацию полученных суммарных эхосигналов для каждой точки с помощью амплитудной огибающей по Гильберту [13]:

$$A(t) = |\Phi(t)|, \quad (8)$$

$$\Phi(t) = \sqrt{\varphi^2(t) + \varphi_{\perp}^2(t)}, \quad (9)$$

где $\varphi(t)$ — исходный вещественный сигнал, $\varphi_{\perp}(t)$ — мнимая составляющая исходного сигнала, $\Phi(t)$ — аналитический сигнал.

Заключительным шагом алгоритма сканирования является определение экстремума функции полученной огибающей:

$$U_{\max}(x, y) = \max_{t_0 \leq t \leq t_0 + T} A(t). \quad (10)$$

Экспериментальные исследования. Предложенный алгоритм апробирован на макете 32-канальной электромагнитно-акустической фазированной решетки и стальном контрольном образце (рис. 1).

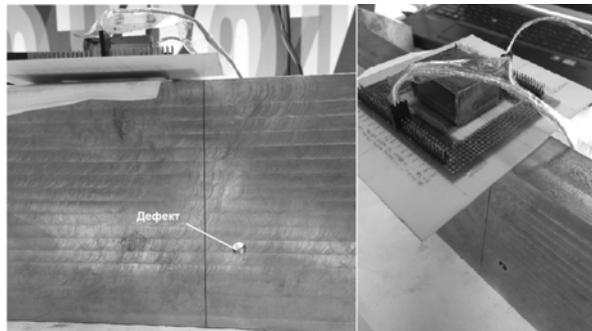


Рис. 1

Для экспериментов был выбран контрольный образец с искусственным отражателем (дефектом), который представляет собой сквозное боковое цилиндрическое отверстие диаметром 8 мм. ЭМАП-ФАР устанавливается над контрольным образцом с зазором в 1 мм. Область зондирования (вычислений) 200×150 мм.

В результате работы алгоритма сканирования получается изображение распределения амплитуд (в условных единицах) эхосигналов по сечению контрольного образца. На рис. 2 приведены результаты экспериментов с применением классической ФАР с 32 реализациями, в которой используются последовательные комбинации пар элементов ФАР „генератор—приемник“: 1-2, 2-3, ..., 31-32 (*а* — секторное сканирование (S-скан), *б* — распределение амплитуд U эхосигналов по горизонтали x и вертикали y для контрольного образца). Из рис. 2, *а* видно, что изображение, полученное с помощью секторного сканирования контрольного образца, содержит большое число перекрестных помех, что препятствует точному определению положения дефектов на контрольном образце. Помехи вызваны шумами (отражениями волн) от концентратора и магнита, входящих в состав датчика ФАР, а также искажениями, вызванными электронной схемой ФАР. Согласно рис. 2, *б*, можно заключить, что перекрестные помехи „затеняют“ достаточно большую площадь сканирования, а пиковые значения помех существенно превышают полезный эхосигнал, отраженный от дефекта.

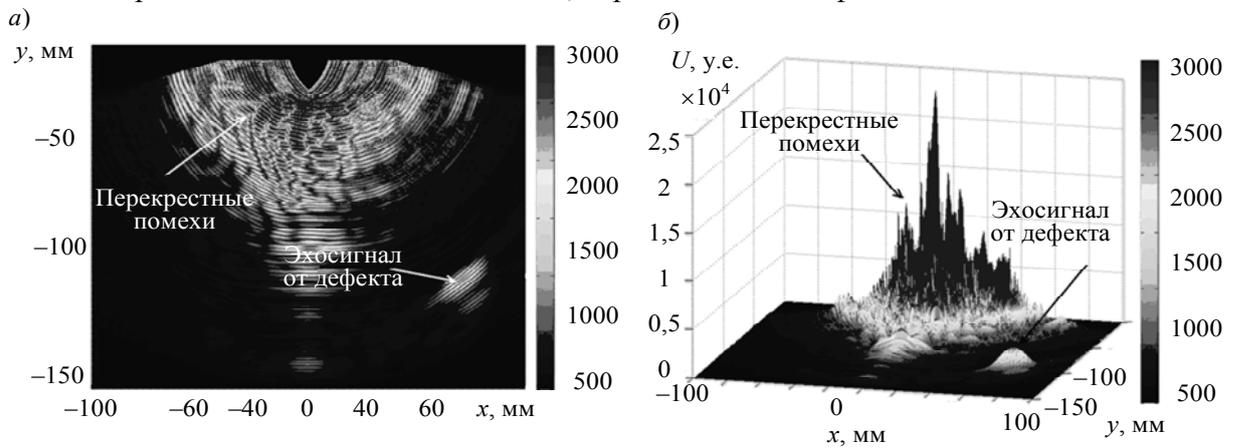


Рис. 2

На рис. 3 продемонстрированы тесты с предложенным алгоритмом сканирования для цифровой ФАР (*а* — секторное сканирование, S-скан, *б* — распределение амплитуд U эхосигналов по горизонтали x и вертикали y для контрольного образца). Для предложенного подхода общее число реализаций составляет $N=992$ и используются все возможные реализации „генератор—приемник“, за исключением диагональных 1-1, 2-2, ..., 32-32. Сравнив рис. 3, *а* и 2, *а*, можно заметить, что применение цифровой ФАР обеспечивает существенное преимущество по сравнению с классическим вариантом. Использование разработанного алгоритма позволяет значительно сократить „мертвую“ зону перекрестных помех и повысить отношение сигнал/шум. Распределение амплитуд в координатной сетке, представленное на рис. 3, *б*, позволяет определять тип и расположение дефекта с более высокой точностью по сравнению с классической ФАР (рис. 2, *б*).

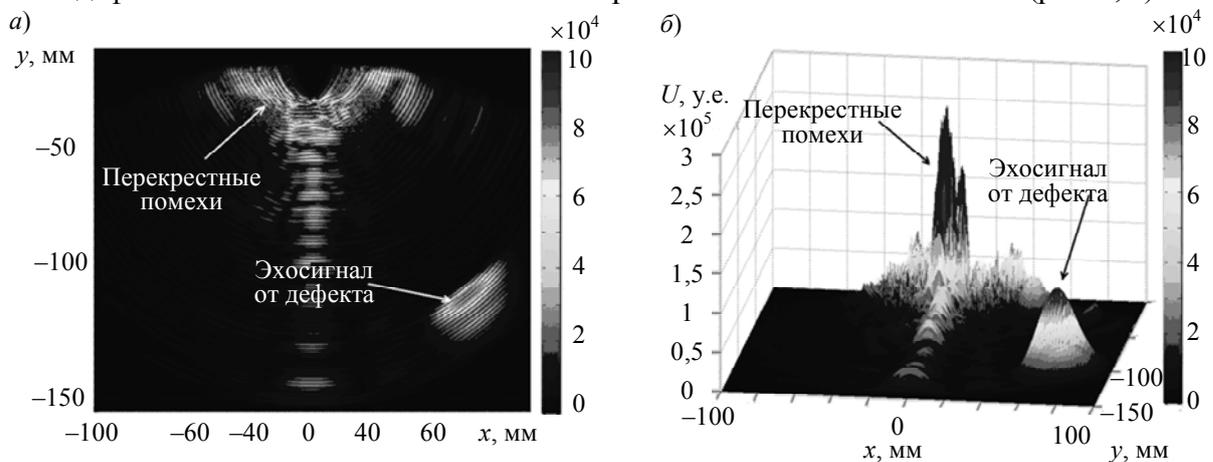


Рис. 3

Заключение. В статье представлено решение задачи диагностирования дефектов трубопроводов с использованием фазированной антенной решетки, выполненной на ЭМАП. Предложен цифровой алгоритм сканирования для ЭМАП-ФАР, который обеспечивает более высокую, по сравнению с классической реализацией ФАР, эффективность. В частности, цифровой алгоритм позволяет достичь более высокой точности при определении типа и местоположения дефекта в трубопроводе, а также более высокого быстродействия.

Статья написана в соответствии с НИОКТР „Создание высокотехнологичного производства роботизированных дефектоскопов для контроля труднодоступных сварных соединений и металлоконструкций опасных производственных объектов в промышленности, энергетике и ЖКХ“ в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. „О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства“ (Соглашение № 074-11-2018-029 от 13 июля 2018 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные методы неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: <<http://ndt.at.ua/publ/4-1-0-2>>.
2. Методы проведения неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: <http://www.devicesearch.ru/article/metody_nerazrushayuschego_kontrolya>.
3. *Соснин Ф. Р., Ковалев А. В.* Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. член-корр. РАН В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003.
4. *Коновалов Н. Н.* Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: НТЦ „Промышленная безопасность“, 2006.
5. Сравнительная таблица методов неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: <<http://oocalis.ru/interesting/52-metody-nk.html>>.
6. *Achenbach J. D.* Wave Propagation in Elastic Solids. NY: Elsevier, 1984.
7. *Lamb H.* On waves in an elastic plate // Proc. Roy. Soc. London A. 1917. N 93. P. 114.
8. *Viktorov I. A.* Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications. NY: Plenum Press, 1967.
9. *Ушаков В. М.* Неразрушающий контроль и диагностика горно-шахтного и нефтегазового оборудования. М.: Горная книга, 2014. 318 с. ISBN: 978-5-98672-370-9
10. *Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Яковлев Н. Н., Ковалев А. В., Шевалдыкин В. Г.* Акустическая В- и С-томография крупнотекстурных материалов импульсным эхометодом // Приборы и системы управления. 1989. № 7. С. 21—24.
11. *Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G.* Thickness Measurements and Flaw Detection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method // Nondestructive Testing and Evaluation. 1997. Vol. 13. P. 73—84.
12. *Ковалев А. В., Козлов В. Н., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г., Яковлев Н. Н.* Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
13. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2002. 608 с.

Сведения об авторах

- Дмитрий Николаевич Базылев** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: bazylevd@mail.ru
- Виталий Александрович Романович** — АО „Диаконт“; отдел системного проектирования; руководитель отдела; Email: romanovich_v@diakont.com
- Сергей Николаевич Сомов** — Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: bazylevd@mail.ru

Антон Александрович Пыркин

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; декан факультета;
E-mail: a.pyrkin@gmail.comПоступила в редакцию
14.09.18 г.

Ссылка для цитирования: Базылев Д. Н., Романович В. А., Сомов С. Н., Пыркин А. А. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1060—1066.

ULTRASONIC INSPECTION OF METAL STRUCTURES USING PHASED ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC ANTENNA ARRAY

D. N. Bazylev¹, V. A. Romanovich², S. N. Somov¹, A. A. Pyrkin¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: org@mail.ifmo.ru

²JSC "Diakont", 195274, St. Petersburg, Russia

The task of pipeline diagnosing with the use of a phased antenna array (FAA) on an electromagnetic-acoustic converter (EMAC) is considered. A new algorithm for phased EMAC arrays is proposed; the algorithm provides improved accuracy characteristics and a faster scanning of a test object than the classical diagnostic method with FAA. The efficiency and performance of the developed scanning algorithm is studied experimentally with the help of the EMAC-FAA prototype and a test sample. Comparison of the new algorithm with the classical one on the base of the experimental results demonstrates that the proposed scanning solution allows to reduce the effect of crosstalk significantly and to increase the signal-to-noise ratio in the distributions of the echo signal amplitudes.

Keywords: phased antenna array, ultrasonic diagnostics, non-destructive testing, electromagnetic-acoustic converter

REFERENCES

1. <http://ndt.at.ua/publ/4-1-0-2>. (in Russ.)
2. http://www.devicesearch.ru/article/metody_nerazrushayuschego_kontrolya. (in Russ.)
3. Sosnin F.R., Kovalev A.V. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika: Spravochnik* (Non-Destructive Testing and Diagnostics: Handbook), Moscow, 2003. (in Russ.)
4. Konovalov N.N. *Normirovaniye defektov i dostovernost' nerazrushayushchego kontrolya svarynykh soyedineniy* (Normalization of Defects and Reliability of Non-Destructive Testing of Welded Joints), Moscow, 2006. (in Russ.)
5. <http://oocalis.ru/interesting/52-metody-nk.html>. (in Russ.)
6. Achenbach J.D. *Wave Propagation in Elastic Solids*, NY, Elsevier, 1984.
7. Lamb H. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1917, no. 93, pp. 114.
8. Viktorov I.A. *Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*, NY, Plenum Press, 1967.
9. Ushakov V.M. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika gorno-shakhtnogo i neftegazovogo oborudovaniya* (Non-Destructive Testing and Diagnostics of Mining and Oil and Gas Equipment), Moscow, 2014, 318 p. ISBN: 978-5-98672-370-9 (in Russ.)
10. Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Yakovlev N.N., Kovalev A.V., Shevaldykin V.G. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 1989, no. 7, pp. 21–24. (in Russ.)
11. Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1997, no. 13, pp. 73–84.
12. Kovalev A.V., Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., Yakovlev N.N. *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, 1990, no. 2, pp. 29–41. (in Russ.)
13. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), St. Petersburg, 2002, 608 p. (in Russ.)

Data on authors

- Dmitry N. Bazylev** — ITMO University, Department of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: bazylevd@mail.ru
- Vitaliy A. Romanovich** — JSC "Diakont", Department of System Design; Head of the Department; Email: romanovich_v@diakont.com
- Sergey N. Somov** — ITMO University, Department of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: bazylevd@mail.ru

Anton A. Pyrkin

—

Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Robotics; Head of the Department;
E-mail: a.pyrkin@gmail.com

For citation: Bazylev D. N., Romanovich V. A., Somov S. N., Pyrkin A. A. Ultrasonic inspection of metal structures using phased electromagnetic-acoustic antenna array. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1060—1066 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1060-1066