

О терминологии в области применения ЦФА/TFM с учётом вышедших стандартов ISO 23865:2021 и ISO 23864:2021

История вопроса

В настоящее время широко используется технология ультразвукового контроля с применением ультразвуковых антенных решёток, излучающих и принимающих волны в исследуемом объекте. Широкое применение в практике ультразвукового контроля нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием антенных решёток: фазированные антенные решётки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решётки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей.

Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения с учётом эффекта трансформации типа волны при многократных отражениях от границ объекта контроля. Под акустической схемой будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приёмника при отражении от неровных границ объекта контроля с учётом трансформации типа волны. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от несплошности).

На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель-приёмник элементов антенной решётки. В Российской литературе в некоторых работах для обозначения этого режима используется термин двойное сканирование, а, если антенная решётка перемещается, то такой сбор эхосигналов называется режимом тройного сканирования. Термин двойное сканирование употреблялся в работах [4, 5], когда при регистрации эхосигналов излучатель и приёмник механически перемещались независимо друг от друга: положение излучателя фиксировалось, а приёмник перемещался по заданной апертуре, регистрируя эхосигналы, затем излучатель перемещался на заданное расстояние и его положение фиксировалось, а приёмник снова регистрировал эхосигналы по заданной апертуре и так далее. С появлением антенных решёток такой способ регистрации эхосигналов стало возможно реализовать без механического сканирования. В зарубежной литературе такой режим регистрации эхосигналов антенной решёткой называется Full Matrix Capture (FMC) [6], который в Российской литературе называют полноматричный захват. В статье [7] режим FMC называется Sampling Phased Array, а в радиолокации и гидроакустике для

обозначения режима регистрации импульсов одной антенной при излучении другой используют термин бистатистический [8].

Для описания способа регистрации эхосигналов вводится понятие коммутационной матрицы c_{ij} , в которой записаны нули или единицы: элемент матрицы равный единице означает, что излучает i элемент антенной решётки, а принимает j элемент. **Регистрация в режиме FMC предполагает, что коммутационная матрица состоит из одних единиц.** Заполняя единицами только нижний или верхний треугольник коммутационной матрицы (такая коммутационная матрица называется Half Matrix Capture (HMC) [9]), можно примерно на 50% уменьшить объем измеряемых эхосигналов, но при этом не удастся увеличить скорость регистрации эхосигналов, так как придётся излучить зондирующий сигнал каждым элементом решётки. Произвольно, например, случайным образом, заполненная единицами коммутационная матрица в зарубежной литературе называется Sparse MatrixCapture (SMC) [10].

На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [11, 12, 13] восстанавливается изображение отражателей. В зарубежной литературе используются термин **Total Focusing Method (TFM) [14], который в настоящее время наиболее употребим.** В статье [15] предложен метод инверсного C-SAFT (invC-SAFT), который учитывает комплексные коэффициенты преломления и отражения и расхождение лучей, что позволяет выровнять чувствительность для ненаправленных отражателей.

При построении секторного скана с применением ФАР-технологии эхосигналы, принятые каждым элементом антенной решётки, сдвигаются согласно закону фокусировки на рассчитанные задержки и суммируются (Delay And Sum (DAS) [16, 17]). Метод DAS можно считать частным случаем метода TFM.

Как связаны методы SAFT (C-SAFT) и TFM? В конце 1940 годов разрабатывались методы получения изображений с высокой разрешающей способностью радиолокатором бокового обзора (РЛБО), или в зарубежной литературе Side Looking Airborne Radar (SLAR), который размещался на борту летательного аппарата (самолет, космический аппарат) [18]. При функционировании радиолокатора в простейшем случае летательный аппарат движется прямолинейным курсом на фиксированной высоте. Подобные задачи в гидроакустике решают гидролокаторы бокового обзора [19]. За почти 80-летнюю историю в радиолокации, гидроакустике, сейсмоакустики и дефектоскопии было разработано множество методов обработки эхосигналов, как во временной области, так и в частотной области, для получения высококачественного изображения, так что аббревиатура SAFT (C-SAFT) стала скорее обозначением целого научно-технического направления. В первых РЛБО изображения получались следующим образом. В каждой точке излучения и приёма регистрировался эхосигнал, затем этот эхосигнал в пересчёте временной апертуры в метры проецировался на фотоплёнку вдоль радиуса в заданном угловом диапазоне из точки. Подобная операция повторя-

лась для многих положений летательного аппарата, и упомянутая операция проводилась для новых точек на фотоплёнке. После этого фотоплёнку проявляли и в тех местах на фотоплёнке, где пересекалось множество дуг, соответствующих отражённому сигналу, и получалось сфокусированное изображение с высокой разрешающей способностью. Так работала первая аппаратура РЛБО в докомпьютерную эпоху. Метод TFM – это, по сути, корреляционный метод, когда для каждого положения излучателя, приёмника и точки фокусировки рассчитываются времена задержек прихода импульса для выбранной акустической схеме. Времена прихода могут рассчитываться как для однородных, так и для неоднородных анизотропных сред с учётом многократных отражений от границ объекта контроля [20]. Поэтому формально метод SAFT (C-SAFT) отличается от метода TFM. Однако, изображения полученные этими двумя методами по одному и тому же набору эхосигналов довольно близки друг к другу. Поэтому с практической точки зрения можно полгать, что «C-SAFT = TFM».

Таким образом вместо того, чтобы говорить изображение, восстановленное методом C-SAFT по эхосигналам измеренным методом двойного или тройного сканирования, достаточно сказать ЦФА-изображение и всем всё должно стать понятно. Можно схематически написать, что

$$\text{ЦФА} = \text{Двойное сканирование} + \text{C-SAFT},$$

или в принятой зарубежной терминологии

$$\text{ЦФА} = \text{FMC} + \text{TFM}.$$

В последнее время стал использоваться режим регистрации эхосигналов, получивший название Plane Wave Imaging (PWI) [21, 22, 23], который был разработан для регистрации эхосигналов антенной решёткой с большим количеством элементов. В объект контроля, как и в ФАР-технологии, всеми элементами решётки излучается набор плоских волн с заданными углами, а регистрация эхосигналов происходит как в режиме FMC, всеми элементами антенной решётки. По измеренным эхосигналам восстанавливается изображение отражателей методом TFM. Увы, в этом случае термин ЦФА требует уточнения – в каком режиме регистрировались эхосигналы?

Стандарты 2021 года

В начале 2021 года вышли два стандарта по применению TFM в ультразвуковом неразрушающем контроле:

- ISO 23865:2021. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies [24],
- ISO 23864:2021. Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of automated total focusing technique (TFM) and related technologies [25].

И это привело к некоторой терминологической путанице при общении специалистов по ультразвуковому контролю между собой. Собственно говоря, неразбериха была и до выхода стандартов! Например, пришлось в разговоре с одним специалистом довольно долго объяснять ему, что ЦФА и

TFM это синонимы в терминах вышедших стандартов. Отметим, что аббревиатура «FMC/TFM», приведённая в названии стандарта ISO 23865:2021, близка к определению «ЦФА = FMC + TFM».

Сопоставление и выводы

Ниже приведена таблица, устанавливающая связь между терминами стандартов и терминами, используемыми в Российской литературе и в эксплуатационной документации на дефектоскоп ультразвуковой многоканальный АВГУР-АРТ, систему автоматизированного ультразвукового контроля АВГУР-ТФ.

Международные стандарты	Российская литература
FMC/TFM	ЦФА
FMC	Двойное сканирование
TFM	C-SAFT
Scanning mechanisms	Тройное сканирование
Imaging path	Акустическая схема

Предлагаемое соответствие терминологии может быть учтено при адаптации международных стандартов в России.

Список литературы

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007.: URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 26.11.2020).
2. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. 2011. №1. С. 21–38.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решётки или фазированные антенные решётки // Дефектоскопия. 2013. №7. С. 51-75.
4. Nahamoo D., Pan B.X., Kak A.S. Synthetic aperture diffraction tomography and its interpolation free implementation. – IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, 1984, SU-31, P. 218-229.
5. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акустический журнал. 2001. Том 47, №6. С. 741-745.
6. Chatillon S, Fidahoussen A, Iakovleva E, Calmon P Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models. - NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25-27, 2009.
7. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F. and Reddy K., Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. - Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad, p, 437-448.
8. Радиотехнические системы/Под. ред. Ю. М. Казаринова. М.: Академия, 2008.
9. Дефектоскоп-томограф А1550 IntroVisor, URL: <https://acsys.ru/defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/> <https://acsys.ru/defektoskop-tomograf-a1550-introvisor-i-skaner-ms150-tuscan/> (дата обращения: 01.07.2021).

-
10. ISO 23865:2021 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies, URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 27.08.2021).
 11. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29-41.
 12. Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F. and Reddy K., Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. - Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad, p, 437-448.
 13. Базулин Е.Г., Голубев А.С., КокOLEV С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов // Дефектоскопия. 2009. №2. С. 18-32.
 14. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int.. 2006. V. 39, №. 7. P. 525– 541.
 15. Базулин Е.Г. Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // Дефектоскопия. 2015. №1. С. 58-71.
 16. Thomenius K.E. Evolution of ultrasound beamformers // Proc.IEEE Int. Ultrason. Symp.. San Antonio. TX. 1996. P. 1615–1622.
 17. Taki H., Taki K., Sakamoto T., Yamakawa M., Shiina T., Kudo M., Sato T. High range resolution ultrasonographic vascular imaging using frequency domain interferometry with the Capon method // IEEE Trans. Med. Imaging. 2012. V. 31, №. 2. P. 417–429.
 18. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны /Учеб. пособие/ СПбГУАП. СПб., 1999 Ч. 2 220 с.: ил..
 19. Применение гидролокаторов бокового обзора для решения задач безопасности судоходства и экологического мониторинга. https://www.vrsystems.ru/stati/primenenie_gidrolokatorov_bokovogo_obzora_dlya_resheniya_zadach_bezopasnosti_sudoxodstva_i_ekologicheskogo_monit.htm
 20. Базулин Е.Г. Учёт анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решёткой // Дефектоскопия. 2017. №1. С. 11-25.
 21. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., Benech N., Fink M. Coherent planewave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. V. 56. 2009. P. 489–506 DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1067
 22. Jeune L. Imagerie ultrasonore par emission d’ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion // Pour l’obtention du grade de Docteur de l’université Paris-Diderot. Paris. 2016. p. 119.
 23. Merabet L., Robert S., Prada C. Comparative study of 2D ultrasound imaging methods in the f-k domain and evaluation of their performances in a realistic NDT configuration // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. V. 66, №. 4. 2019. P. 772-788/ DOI: 10.1063/1.5031654
 24. ISO 23865:2021. Non-destructive testing — Ultrasonic testing — General use of full matrix capture/total focusing technique (FMC/TFM) and related technologies. <https://www.iso.org/standard/78034.html>
 25. ISO 23864:2021. Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of automated total focusing technique (TFM) and related technologies. <https://www.iso.org/standard/77203.html>