

УДК 621.385

## ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДООРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ И СПЛИТ-СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК

*Е. Г. БАЗУЛИН, В. К. АВАГЯН*

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.385

## APPLICATION OF PSEUDOORTOGONAL SIGNALS AND SPLIT-SIGNALS FOR INCREASING THE SPEED OF ECHOSIGNAL REGISTRATION BY ANTENNA ARRAYS

*E. G. BAZULIN, V. K. AVAGYAN*

### **Аннотация**

В статье рассматривается метод ускорения регистрации эхосигналов антенной решёткой для восстановления изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенной. При регистрации эхосигналов предлагается одновременно излучать всеми элементами антенной решётки псевдоортогональные сигналы (или сплит-сигналы) по технологии, применяемой в технике многоканальной связи CDMA (Code Division Multiple Access). После декодирования принятых эхосигналов, изображение отражателей восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT). Представлены результаты численных экспериментов по восстановлению изображения точечного отражателя для оценки уровня шума межканальных помех.

### **Ключевые слова:**

ультразвуковой контроль, CDMA, антенная решетка (АР), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), режим двойного сканирования, псевдослучайные сигналы, сплит-сигналы.

### **Abstract**

The article considers the method of accelerating the registration of echoes by an antenna array for image reconstruction of reflectors by the method of antenna digital focusing. When registering echoes, it is proposed to radiate pseudo-orthogonal signals (or split-signals) by all the antenna array elements simultaneously using technology used in CDMA (Code Division Multiple Access) technology. After decoding the received echoes, the image of the reflectors is restored using the combined SAFT (C-SAFT) method. The results of numerical experiments on image reconstruction of a point reflector for estimating the noise level of interchannel interference are presented.

### **Key words:**

ultrasonic testing, CDMA, antenna array, antenna digital focusing, dual scanning mode, pseudo-random signals, split-signals.



В настоящее время в практике ультразвукового контроля широко применяются дефектоскопы, использующие антенные решётки (АР). Метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [1] позволяет визуализировать внутренний объем объектов контроля. На первом этапе применения ЦФА-технологии эхосигналы измеряются при излучении и приёме всеми комбинациями пар элементов АР [2]. На втором этапе изображение отражателей по измеренным эхосигналам восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [2, 3], который можно модифицировать для учёта многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами и наличием областей с разными акустическими свойствами [4]. Недостатком регистрации эхосигналов методом двойного сканирования является большой объем измеренных данных – при увеличении количества элементов АР  $N_e$  объём зарегистрированных эхосигналов растёт квадратично. Это приводит к увеличению времени регистрации эхосигналов, что может оказаться критичным при проведении контроля на ряде объектов. Поэтому задача повышения скорости регистрации эхосигналов и уменьшения их объема весьма актуальна как для ультразвукового контроля, так и для медицинской ультразвуковой диагностики.

Для уменьшения времени регистрации эхосигналов АР, работающих в режиме двойного сканирования, можно отказаться от последовательного излучения импульсов элементами АР и излучать одновременно всеми элементами АР псевдоортогональные сигналы, сформированные на основе кодовых наборов кодирующих сигналов (коды Касами, де Брейна, Задова-Чу, Велти и пр.) [5], которые широко используются в технике многоканальной связи CDMA (Code Division Multiple Access). Кодовый набор характеризуется длиной сигнала или кода  $N_e$  (числом чипов), числом сигналов в наборе  $N_k$ . Количество кодовых наборов  $N_p$  определяет мощность последовательности. На основе кодовых наборов генерируются фазоманипулированные зондирующие сигналы  $s_n(t)$  для возбуждения элементов АР. Корреляционная функция  $R_{nm}(\tau)$  такого набора сигналов  $s_n(t)$  должна обладать следующим свойством:

$$R_{nm}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_n(t)s_m(t+\tau)dt \approx \delta_{nm}\delta(\tau), \quad n, m = 1, 2, \dots, N_e, \quad (1)$$

где  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера.

Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования происходит следующим образом. Пусть АР имеет четыре элемента  $N_e=4$ , каждому из которых на рис. 1 приписан свой цвет, соответствующий кодовому сигналу  $s_n(t)$ . Сначала излучает первый элемент АР и эхосигналы (показаны прямоугольниками розового цвета) регистрируются всеми элементами АР

(выстрел номер один  $1 \rightarrow 1:4$ ). Затем излучает второй элемент AP с приёмом эхосигналов (прямоугольники голубого цвета) всеми элементами AP. Так продолжается пока не излучат все 4 элемента. За четыре такта произойдет измерение  $N_e^2 = 16$  эхосигналов  $p_{nm}(t)$ . В режиме двойного сканирования каждый элемент AP возбуждается одним и тем же зондирующим сигналом  $s(t)$ . В правой части рис. 1 представлен результат регистрации эхосигналов в режиме CDMA, когда каждый элемент AP излучает свой уникальный зондирующий сигнал  $s_n(t)$ , а эхосигналы  $p_m(t)$  одновременно принимаются всеми элементами AP.

Для восстановления изображения методом C-SAFT эхосигналы  $p_m(t)$  нужно декодировать, чтобы  $m$ -ый абонент мог выделить сообщение  $p_{nm}(t)$  от абонента с номером  $n$ . То есть получить эхосигналы, так как будто они были измерены в режиме двойного сканирования. Такой подход позволяет вместо 4-ёх измерений провести только одно, а количество эхосигналов сократить до  $N_e$ . Чем больше число элементов AP, тем больше выигрыш в скорости измерений эхосигналов в сравнении с режимом двойного сканирования. Декодирование эхосигналов  $p_m(t)$  позволяет каждому  $m$ -ому абоненту выделить свой сигнал из суммарного сигнала (рис. 1) благодаря свойству псевдоортогональности (1) сигналов  $s_n(t)$ . Распространённым методом декодирования является сжатие сложных сигналов  $p_m(t)$  с помощью согласованной фильтрации с кодовым сигналом  $s_n(t)$ . Такой алгоритм сжатия сложных сигналов обладает высоким быстродействием и позволяет получать изображения с частотой более 10 Гц, но он не позволяет получить низкий уровень межканальных помех. Более сложный метод декодирования или деконволюции простых или сложных сигналов, позволяющий уменьшить уровень межканальных помех и уменьшить длительность эхосигналов, основан на использовании метода максимальной энтропии (МЭ) [6]. Такой способ декодирования позволяет получить оценку эхосигнала со сверхразрешением и с низким уровнем шума.



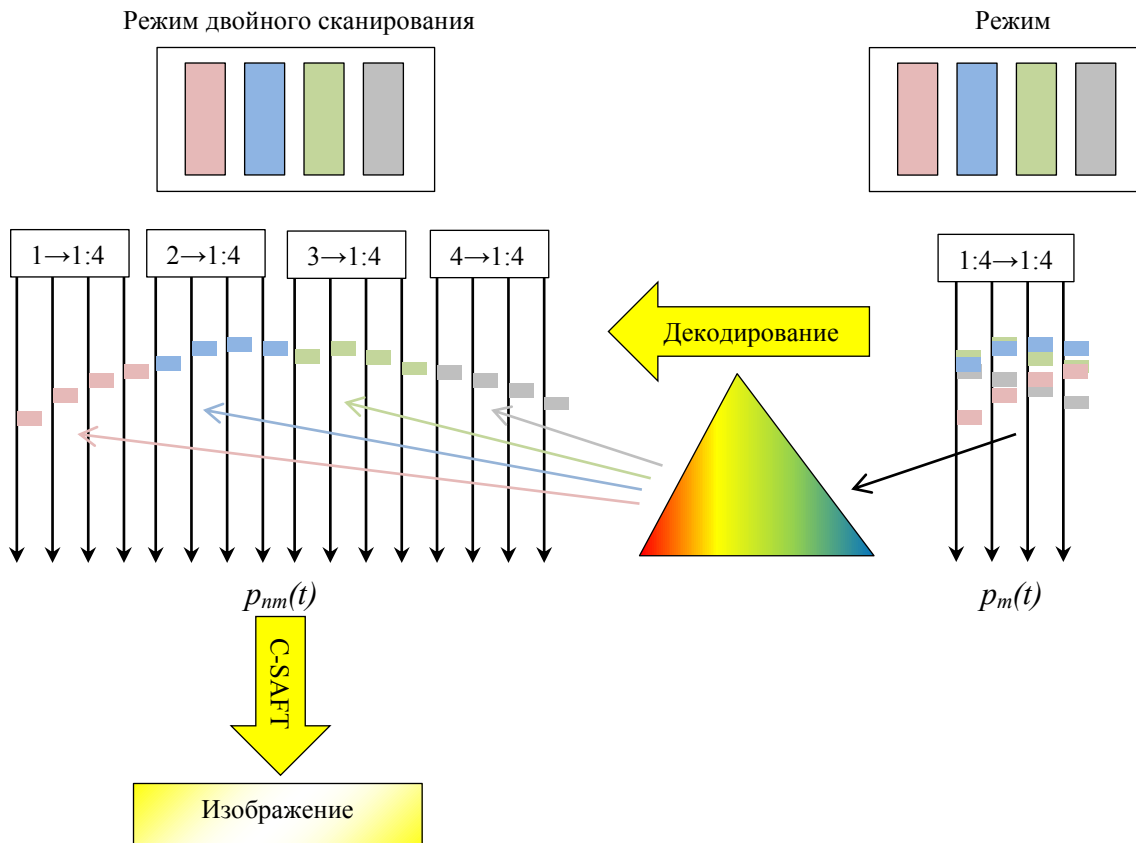


Рис. 1. Повышение скорости регистрации эхосигналов

В качестве набора псевдоортогональных кодов были рассмотрены следующие кодовые последовательности: Касами, Задова-Чу, Велти, а также последовательности случайных фаз с равномерным распределением в интервале  $[-\pi, \pi]$ . При генерации зондирующих сигналов полагалось, что несущая частота каждого чипа равномерно случайным образом меняется в заданном частотном диапазоне  $(f_c - \Delta f, f_c + \Delta f)$ , где  $f_c$  – центральная частота АР. Изменение несущей частоты используется в технологии FDMA (Frequency Division Multiple Access). В ходе моделирования было обнаружено, что уровень межканальных помех при  $\Delta f \approx f_c/2$  для упомянутых выше сигналов соизмерим. Уровень межканальных помех обычно оценивается как  $1/\sqrt{N_c}$ . Чтобы он был порядка -20 дБ, длина последовательности должна быть не меньше  $N_c \approx 100$ .

Частотно-модулированные сигналы не подошли по причине высокого уровня межканальных помех для случая 32 элементных АР и сигналов с шириной полосы пропускания, соизмеримой с рабочей частотой.

Однако увеличение длины кодовой последовательности  $N_c$  приводит к невозможности проведения контроля тонкостенных объектов. Использование сплит-сигналов [7], то есть излучение  $M$  разных сигналов, которые после приёма обрабатываются совместно, позволит уменьшить в  $M$  раз длину последовательности с сохранением уровня межканальных помех. При этом вместо того, чтобы излучить один раз набор кодовых последовательностей

длиной 100, можно 10 раз излучить сигналы длиной 10. Но скорость регистрации эхосигналов уменьшится в  $M$  раз.

Эффективность предложенного метода ускорения регистрации эхосигналов была оценена в численном эксперименте. Для этого были рассчитаны эхосигналы, рассеянные точечным отражателем с координатами (0,30) мм в однородной изотропной среде с использованием АР (без призмы), центр которой расположен в точке (0,0) мм. АР состояла из 32 элементов с шагом 0,5 мм. На рис. 2 представлено изображение отражателя, восстановленное методом C-SAFT по эхосигналам, рассчитанным для режима двойного сканирования при использовании Гауссоподобного сигнала  $s(t)$  длиной два периода несущей частоты, равной 5 МГц. Отношение сигнал/шум изображения (SNR) далее будет оцениваться как отношение амплитуды главного максимума изображения к амплитуде второго локального максимума. SNR изображения на рис. 2 равно 33 дБ.

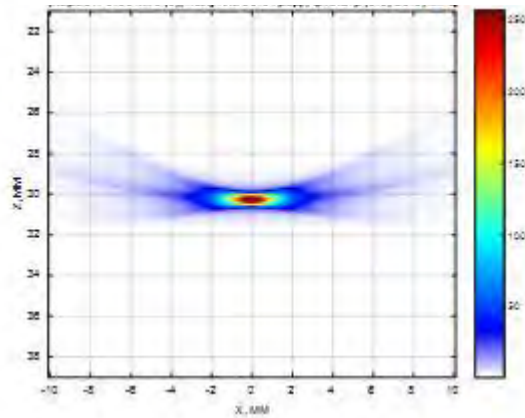


Рис. 2. Изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования

Задачу повышения скорости регистрации эхосигналов предложенным способом будем считать решённой, если удастся получить изображение с SNR более 20 дБ и, при этом более чем в 8 раз, повысить скорость регистрации по отношению к режиму двойного сканирования. Численное моделирование для всех упомянутых выше кодовых последовательностей показало, что для  $f_c=5$  и  $\Delta f=2$  МГц изображения точечного отражателя отличается не принципиально для соизмеримых  $N_e$ . Так как  $N_e$  и  $N_k$  для ПСФ можно выбирать любыми, то им и было отдано предпочтение.

На рис. 3 показаны изображения точечного отражателя при использовании ПСФ с  $N_e=63$ . На рис. 3 слева – при декодировании  $p_m(t)$  согласованной фильтрацией (SNR=11,8 дБ), а справа – при декодировании методом МЭ (SNR=17,5 дБ). Продольная разрешающая способность МЭ-изображения в два раза выше, чем у СФ-изображения. Однако, для обоих изображений SNR меньше 20 дБ. Повышение частоты сигналов после декодирования методом МЭ привело к повышению уровня шума МЭ-изображения из-за грубого шага между центрами элементов АР.

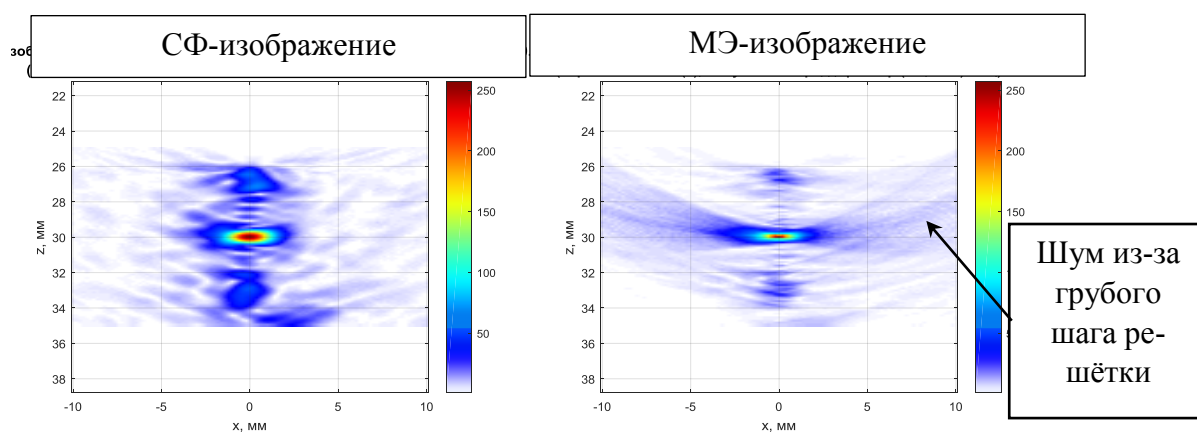


Рис. 3. Изображение точечного отражателя при использовании последовательностей со случайной фазой длины  $N_c = 63$

На рис. 4 приведены аналогичные изображения, но при использовании сплит-сигналов ( $N_c=15$ ,  $M=4$ ,  $N_cM=60$ ). На Рис. 4 слева – СФ-изображение (SNR=14,7 дБ), а справа – МЭ-изображение (SNR=20,6 дБ). Только МЭ-изображение имеет требуемое значение SNR.

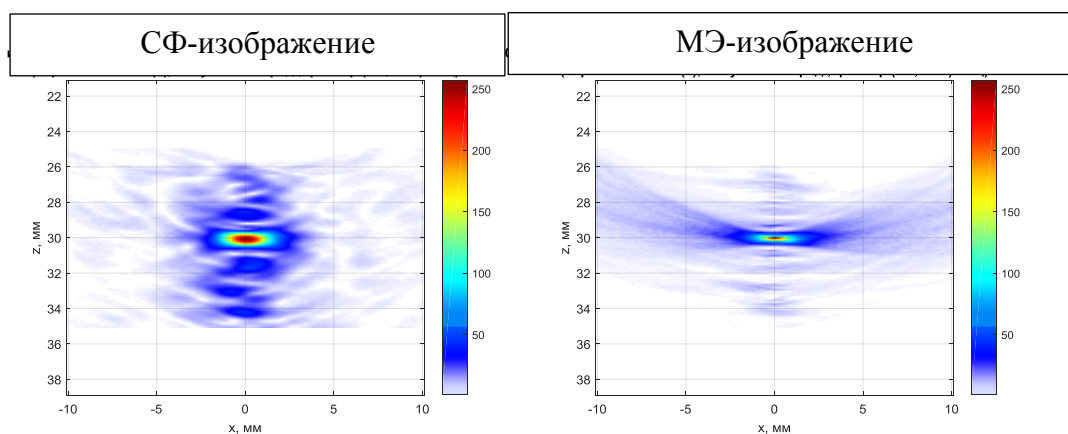


Рис. 4. Изображение точечного отражателя при использовании сплит-сигналов ( $N_c=15$ ,  $M=4$ ,  $N_cM=60$ )

Важная особенность метода C-SAFT заключается в том, что изображение можно получить при когерентной обработке эхосигналов, измеренных AP во  $N_w$  положениях в пространстве. Если для каждого положения приписать свою кодовую последовательность, то такой подход позволит дополнительно повысить отношение сигнал/шум в  $\sqrt{N_w}$ . Численное моделирование подтвердило эффективность такого подхода. Ещё один способ повышения SNR заключается в разбиении AP на две и более подрешёток и проведении измерений эхосигналов по рассматриваемой технологии всеми комбинациями подрешёток. Например, если AP из 32 элементов разбить на две AP из 16-и элементов, то нужно провести четыре измерения, то есть скорость регистрации уменьшится в четыре раза.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Для ускорения регистрации эхосигналов с помощью AP можно использовать последова-



тельности со случайной фазой. Декодирование эхосигналов  $p_m(t)$  можно проводить согласованной фильтрацией или методом МЭ. Декодирование методом МЭ даёт более низкий уровень межканальных помех по сравнению с декодированием согласованной фильтрацией, но скорость работы метода МЭ значительно меньше. Для уменьшения длины зондирующих сигналов  $s_n(t)$  с целью контроля тонкостенных объектов можно воспользоваться сплит-сигналами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О применимости технологии антенных решёток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов / В. А. Воронков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1. – С. 64–70.
2. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А. В. Ковалев [и др.] // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 29–41.
3. 3D Ultrasonic Imaging by Cone Scans and Acoustic Antennas / I. Bolotina // 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012. Durban. South Africa
4. **Базулин, Е. Г.** Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учётом анизотропии материала объекта контроля / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 42–52.
5. **Базулин, Е. Г.** Повышение скорости регистрации ультразвуковых эхосигналов для режима двойного сканирования / Е. Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 27–44.
6. **Базулин, А. Е.** Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле / Е. Г. Базулин // Акуст. журн.. – 2009. – № 6. – С. 772–783.
7. **Качанов, В. К.** Ультразвуковая помехоустойчивая дефектоскопия / В. К. Качанов, В. Г. Карташев, И. В. Соколов. – М. : Издательский дом «МЭИ», 2007. – 280 с.

