

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУР СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ БЕТОННЫХ СВАЙ ИМПАКТ-МЕТОДОМ

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023; после доработки 10.07.2023

Принята к публикации 13.07.2023

Для контроля бетонных свай применяют импакт-метод, который позволяет регистрировать эхосигналы от подошвы сваи и от отражателей в ней. Однако разрешающая способность измеренного эхосигнала недостаточно высокая, чтобы уверенно разделять отраженные импульсы и определять их фазу. Применение метода максимальной энтропии (МЭ) позволило повысить разрешающую способность эхосигналов, полученных импакт-методом в бетонной свае длиной 3000 мм, примерно в три раза и уверенно идентифицировать эхосигналы от искусственных отражателей как в виде диска толщиной 100 мм, так и в виде параллелепипеда высотой 300 мм. Применение метода Compressive Sensing (CS) позволило повысить разрешающую способность этих же эхосигналов примерно в десять раз. Основной проблемой успешного применения методов МЭ и CS является определение импульсного отклика бетонной сваи при ударе. Предложен способ оценки импульсного отклика по обрабатываемому эхосигналу.

Ключевые слова: контроль бетонных свай, импакт-метод, сверхразрешение, метод максимальной энтропии, метод Compressive Sensing.

DOI: 10.31857/S0130308223080043, EDN: DYWHSA

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе строительства очень важным является этап изготовления свайных полей. В настоящий момент времени процент использования свай заводского изготовления уменьшается. Это связано с тем, что при забивке свай в грунт из-за больших вибраций возможны аварии и разрушения окружающей застройки. Более безопасным методом возведения свайных оснований за счет минимизации вибрационного воздействия является технология погружения свай вдавливанием [1]. В этом случае в грунте подготавливают скважину, устанавливают арматурный каркас и заполняют скважину бетонной смесью. Так как бетонная смесь оказывается в грунте до начала своего твердения, то она подвержена воздействию большого количества факторов, которые могут привести к появлению дефектов в теле бетонной сваи, что в итоге может оказать негативное влияние на устойчивость возводимого сооружения. Это обстоятельство накладывает особые требования на контроль бетонных свай.

В настоящее время разработано множество методов контроля свай, основанных на различных физических принципах. Параллельный сейсмический метод представляет собой скважинные испытания для определения длины свайного фундамента и для обнаружения дефектов [2, 3]. Для проведения испытаний необходимо пробурить вспомогательную скважину близко к испытываемой свае на глубину не менее чем на 3000 мм ниже ожидаемой длины сваи. Приемник, перемещающийся по вспомогательной скважине, регистрирует продольные и/или поперечные волны, распространяющиеся вдоль тела сваи, после ударного воздействия по любой ее части. Точность определения длины сваи при помощи данного метода оценивается как 5 % [4]. Однако из-за бурения вспомогательной скважины и сканирования приемником данный метод является трудоемким.

Метод односкважинного ультразвукового каротажа разработан для оценки сплошности железобетонных свайных фундаментов. По трубке доступа, заполненной водой и прикрепленной к арматурному каркасу, для регистрации эхосигналов сканируют источник и приемник звука. Трубка доступа должна быть изготовлена из полимерного материала, так как при использовании металлических трубок, могут возникать значительные реверберационные помехи, затрудняющие интерпретацию измеренных сигналов [5]. Недостаток метода заключается в трудоемкости установки трубки доступа до момента бетонирования сваи.

Межскважинный ультразвуковой метод разработан для оценки длины и сплошности буровых и буронабивных свай. Для его реализации нужно две трубки доступа, заполненные водой, для

перемещения источника и приемника звука. Анализ скорости и затухания ультразвуковых волн, которые распространяются между трубками доступа, позволяет делать выводы о наличии аномалий в контролируемой свае [6]. По трудоемкости межскважинный ультразвуковой метод сложнее метода односкважинного ультразвукового каротажа.

Метод межскважинной ультразвуковой томографии применяется в нефтяной и инженерной геофизике для изучения характеристик массивов горных пород. Его можно использовать и для контроля сплошности бетонных свай [7, 8]. Эхосигналы вокруг интересующей области измеряются для множества комбинаций расположения источника и приемника. Недостаток метода заключается в большом объеме измеренных эхосигналов при сканировании излучателем и приемником по двум трубкам доступа. Однако такой подход позволяет получать наиболее достоверную информацию о характере аномалий в бетонной свае.

На практике применяются несколько электромагнитных методов, предназначенных для контроля железобетонных конструкций, например, скважинная георадиолокация, импульсная рефлектометрия, метод сопротивлений [9, 10]. Один из таких методов используется для определения глубины заложения свайного фундамента и основан на измерении магнитного поля, возбуждаемого током, проходящим по стальным элементам сваи [11]. Датчик напряженности магнитного поля перемещается во вспомогательной скважине рядом со свайей. При нахождении датчика у подошвы сваи напряженность магнитного поля будет значительно снижена, что и используется для определения ее длины. Сложность контроля заключается в трудоемкости процесса бурения вспомогательной скважины и необходимости сканирования датчиком напряженности магнитного поля.

Радиометрический метод гамма—гамма предназначен для контроля сплошности свайных фундаментов и основан на количестве регистрируемых частиц в единицу времени приемным элементом, перемещающимся по трубке доступа. Принцип действия метода основан на измерении интенсивности обратного рассеяния от материала вокруг трубки доступа, которая зависит от плотности материала сваи [12]. Ограничения метода заключаются в контроле небольшого участка сваи вокруг трубки доступа и в невозможности локализовать несплошность — ее можно только обнаружить. Кроме того, работа с гамма-излучением создает дополнительную опасность для рабочих на стройке.

Все перечисленные выше методы достаточно трудоемки при подготовке и проведении контроля большого количества свай при строительстве, поэтому задача разработки простого и эффективного метода контроля бетонных свай является актуальной задачей.

Для контроля бетонных свай можно использовать импакт-метод [13, 14], который достаточно прост в реализации. Нужен молоток для удара по оголовку сваи и достаточно простой прибор с пьезоэлектрическим преобразователем, установленным на оголовке сваи, для регистрации эхосигнала [15]. Однако разрешающая способность эхосигналов может оказаться очень низкой для выделения эхосигналов от отражателей и даже от подошвы сваи. Для повышения эффективности обработки эхосигналов, полученных импакт-методом, в статьях [16, 17] для анализа фазы эхосигналов было предложено применять вейвлет-анализ.

Повышение частоты возбуждающего импульса, с одной стороны, повышает разрешающую способность эхосигналов, но, с другой стороны, уменьшает амплитуду эхосигналов из-за возросшего затухания. Для повышения разрешающей способности низкочастотных эхосигналов, полученных импакт-методом, можно воспользоваться методами сверхразрешения: методом максимальной энтропии (МЭ) [18] или методом распознавания со сжатием (Compressive Sensing, CS) [19, 20]. С их помощью можно в несколько раз повысить разрешающую способность эхосигнала.

В 1948 г. К. Шеннон [21] использовал понятие энтропии для оценки объема информации сообщения, состоящего из конечного набора символов алфавита. В текстовом сообщении заключен максимальный объем информации, если за любым знаком в сообщении может появиться с одинаковой вероятностью любой знак алфавита. С комбинаторной точки зрения, такое сообщение позволяет ограниченным набором символов алфавита создать максимальное количество разных сочетаний. С точки зрения повышения разрешающей способности, применение в качестве регуляризирующего функционала энтропии позволяет перенести поиск решения на множество эхосигналов, в которых за любым отсчетом может следовать отсчет с любым значением, т.е. ограничение на крутизну фронта решения эхосигнала снимается. Так, при обычной деконволюции фронт сигнала практически не меняется, т.е. за буквой «ь» никогда не появится буква «ъ», но после регуляризации крутизна фронта может возрасти — за буквой «ь» может появиться любая буква, в том числе и «ъ».

Метод распознавания со сжатием основан на понятии разреженного сигнала. Это означает, что измеренный эхосигнал, состоящий из сотен или тысяч отсчетов, порожден сигналом, в котором от нуля отличны несколько десятков отсчетов. Это приводит к тому, восстановленный сигнал будет иметь вид набора δ -функций, т.е. будет обладать свойством сверхразрешения. Изысканная геометрическая интерпретация работы метода CS приведена в работе [16].

Одна из проблем применения методов сверхразрешения заключается в получении информации об импульсной характеристике системы, т.е. нужно знать форму эхосигналов от отражателей на разных глубинах. Если форма отраженного импульса зависит от глубины, то при наличии информации о характере его изменения, применение методов сверхразрешения вполне эффективно [22]. Существуют методы слепой деконволюции, которые позволяют получать информацию об импульсном отклике системы, не измеряя его. Эти методы применяются при обработке изображений с целью устранения эффекта неизвестного смещения камеры [23] или в сейсмоакустике при обработке эхосигналов [24].

2. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки работы метода МЭ и CS было проведено простейшее моделирование. На рис. 1а показан отклик системы в виде импульса с центральной частотой 1,2 КГц, временем нарастания и спада импульса 1250 мкс. Полагалось, что в свае длиной 3000 мм и скоростью звука 4 мм/мкс на расстоянии 1000 мм есть отражатель, порождающий импульс амплитудой $-0,4$. Импульс на оголовке сваи имеет амплитуду 1, однократно отраженный от подошвы сваи — $0,8$, а двукратно отраженный — $0,6$. На рис. 1б показан рассчитанный эхосигнал, на котором импульсы от отражателя не видно из-за большой длительности отклика. Вертикальными линиями черного цвета показаны времена прихода трех первых импульсов.

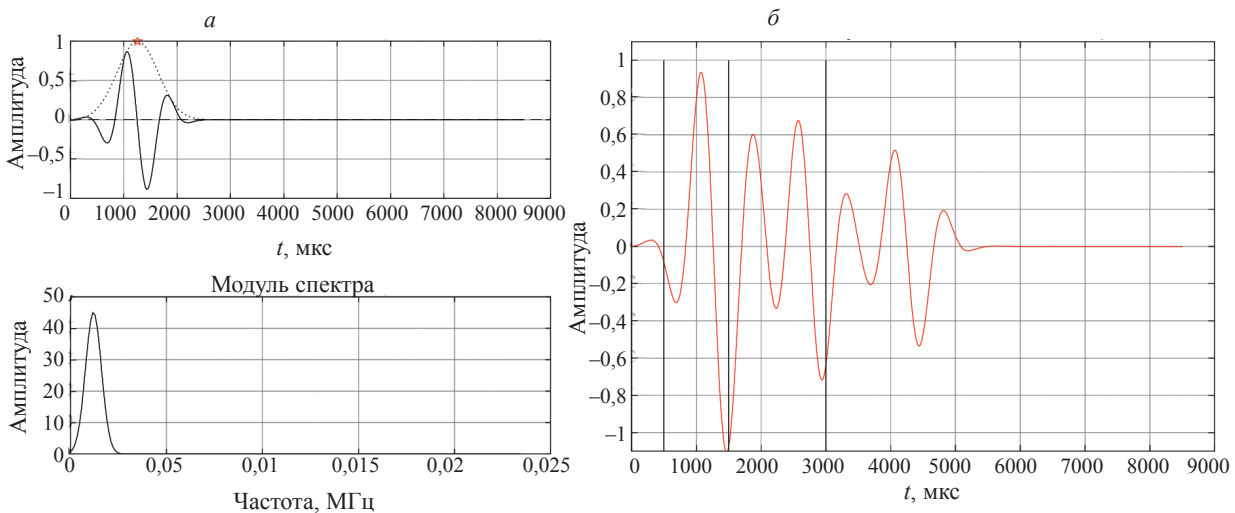


Рис. 1. Импульсный отклик системы (а) и смоделированные эхосигналы (б).

На рис. 2а показан результат обработки рассчитанного эхосигнала методом МЭ, а рис. 2б — методом CS. На рисунках графиком красного цвета показан исходный сигнал, а графиком черного цвета — сигнал после применения процедур достижения сверхразрешения. Видно, что два метода при выборе оптимальных параметров и при известном импульсном отклике системы хорошо разрешили все четыре импульса с сохранением информации об их фазе. Разрешающая способность после применения метода МЭ возросла примерно в три раза, а после применения метода CS более чем в десять раз. Такое существенное повышение разрешающей способности объясняется тем, что при расчетах был точно известен импульсный отклик системы и отношение сигнал/шум было высоким [25]. Следует отметить, что после проведения процедуры разрешения амплитуды бликов отличаются от заданных при расчете примерно на 20 %.

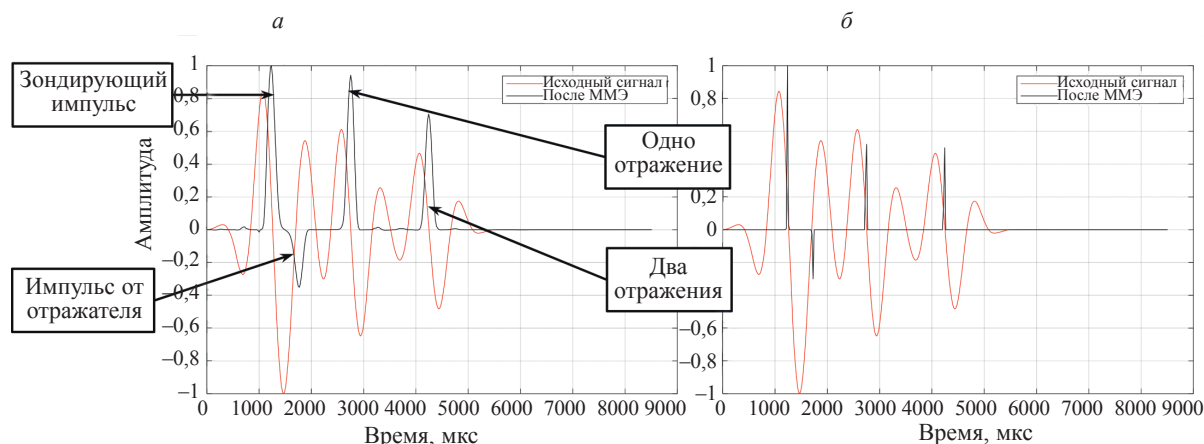


Рис. 2. Результат обработки рассчитанного эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б).

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В работах [16, 26] подробно описаны условия измерения эхосигналов в модельных экспериментах, результаты обработки которых приведены в данной статье. Для подготовки испытательных образцов (свай) были изготовлены арматурные каркасы длиной 3000 мм, состоящие из шести продольных стержней арматуры диаметром 18 мм. Внутренний диаметр каркаса равен 250 мм. Внутри арматурного каркаса при помощи вязальной проволоки закреплялись отражатели (рис. 3), выполненные из полистирола. Проводилось бурение скважины, размещение в ней арматурного каркаса и бетонирование скважины. При изготовлении свай их длина и местоположение отражателей тщательно не контролировалось, особенно в области подошвы, так как изначально не предполагалось, что измеренные эхосигналы будут обрабатываться методами достижения сверхразрешения. Ударным источником при проведении испытания являлся молоток с резиновой насадкой, а эхосигналы регистрировались прибором «Спектр 4.0» [15].

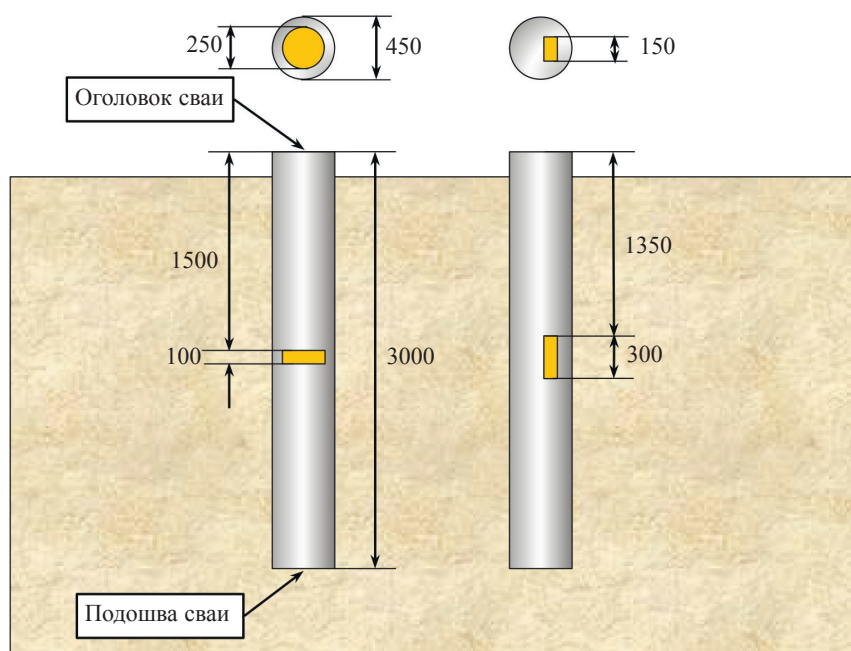


Рис. 3. Геометрические характеристики монолитных железобетонных свай: свая с искусственным дефектом диаметром 250 мм и толщиной 100 мм (а); свая с искусственным дефектом 100×150×300 мм (б).

Специфика решаемой задачи не позволяет выделить из измеренного эхосигнала один импульс и полагать его равным импульсному отклику системы, что обычно можно сделать в ультразвуковой дефектоскопии на мегагерцовых частотах и толщинах объектов контроля более 10 мм. При обработке эхосигналов, измеренных в модельных экспериментах, использовался следующий прием. Предполагалось, что отраженные импульсы имеют Гауссоподобную форму с неизвестными частотой, временем нарастания и спада и с нулевой фазой. Спектр измеренного эхосигнала имеет сильно изрезанный спектр из-за наличия множества импульсов на временной апертуре. Импульсным откликом полагался такой Гауссоподобный сигнал, спектр которого был максимально близок к спектру измеренного сигнала. Такой подход оправдал себя при обработке эхосигналов, полученных в модельном эксперименте (рис. 4а). Косвенным признаком правильно выбранного импульсного отклика служит то обстоятельство, что импульсы на оголовке сваи и от ее подошвы после применения процедур сверхразрешения должны выглядеть максимально похожими на дельта-импульс.

3.1. Свая без дефектов

На рис. 4а показана оценка импульсного отклика (частота 0,825 КГц, длина импульса $(2,12 + 1,82)$ мс), а на рис. 4б представлен исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета), что позволило повысить разрешающую способность примерно в три раза. Самый первый ложный импульс связан с тем, что эхосигнал измерялся не с нулевого момента времени. Между первым и вторым импульсом появилась область, на которой можно будет заметить эхосигналы от отражателей в свае. Импульс на рис. 4а достаточно хорошо совпадает с импульсным откликом сваи.

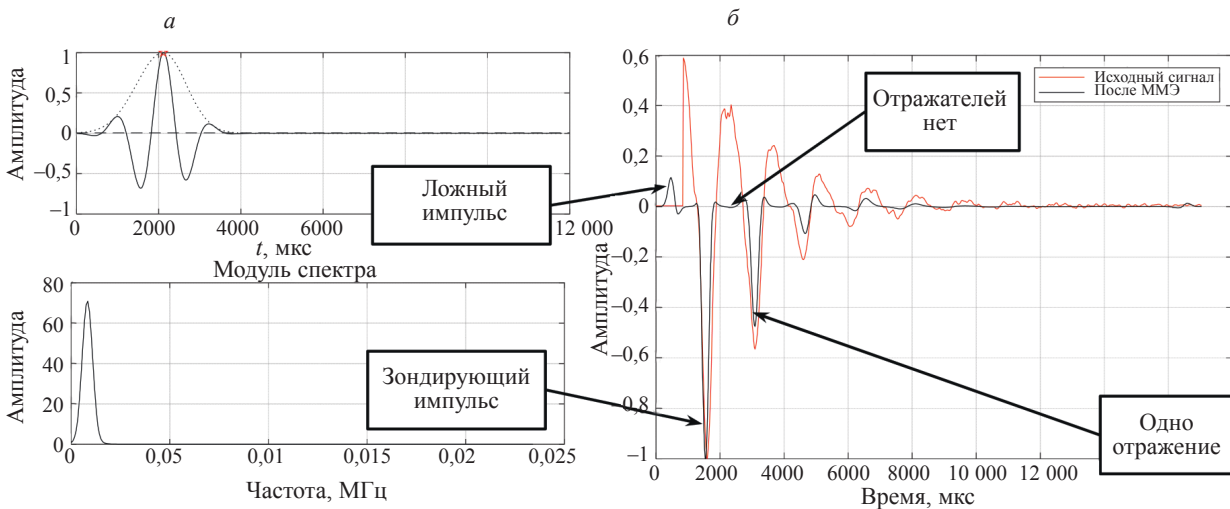


Рис. 4. Импульсный отклик системы (а) и результат применения метода МЭ (б).

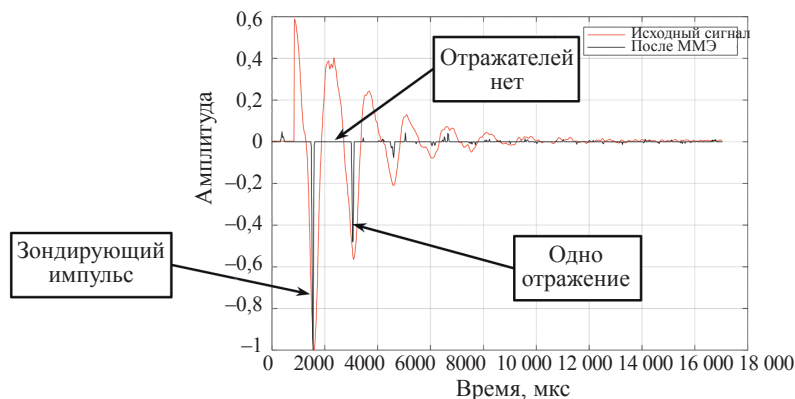


Рис. 5. Результат применения метода CS.

На рис. 5 показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода CS (график черного цвета). Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 2б). Между зондирующим импульсом и первым отраженным нет импульсов, так как свая бездефектная. Импульсы на оголовке сваи и от ее подошвы после применения метода CS выглядят как дельта-импульсы. Подобные результаты были получены при обработке нескольких измерений.

3.2. Свая с отражателем в виде диска толщиной 100 мм

На рис. 6а показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета), увеличивший разрешающую способность примерно в три раза. На рис. 6а стал заметен эхосигнал от диска в середине сваи на «прямом луче» и при двух- и трехкратном отражении от концов сваи. Важно то, что эхосигнал от диска имеет противоположную фазу по отношению к импульсам, отраженным от концов сваи [14]. На рис. 6б красным цветом показаны исходные эхосигналы, а черным — результат обработки методом CS. Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 6а). Но даже при таком повышении разрешающей способности на рис. 6б разрешить эхосигналы, отраженные от краев диска, не удастся. Подобные результаты были получены при обработке нескольких измерений.

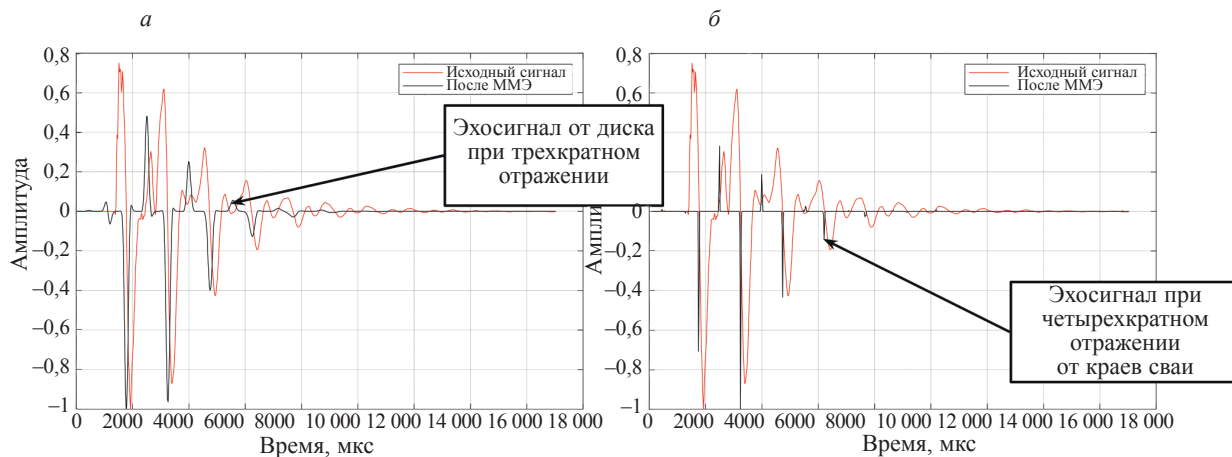


Рис. 6. Результат обработки экспериментального эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б) при отражении от диска толщиной 100 мм.

3.3. Свая с отражателем в виде параллелепипеда высотой 300 мм

На рис. 7а показан исходный эхосигнал (график красного цвета) и результат применения метода МЭ (график черного цвета). Разрешающая способность эхосигнала возросла примерно в три раза и стал заметен импульс от параллелепипеда в середине сваи даже при двукратном отражении от концов сваи. Как и на рис. 6а, эхосигнал от параллелепипеда имеет противоположную фазу по отношению к импульсам, отраженным от концов сваи. На рис. 7б красным цветом показаны исходные эхосигналы, а черным цветом — результат обработки методом CS. Разрешающая способность возросла примерно в десять раз, что заметно больше по сравнению с методом МЭ (см. рис. 7а). И в этом случае разрешить эхосигналы, отраженные от краев параллелепипеда высотой 300 мм, не удастся. Близкие результаты были получены при обработке нескольких измерений эхосигналов.

3.4. Определение скорости и глубины залегания отражателей

Скорость продольной волны в бетонной свае длиной 3000 мм можно определить, измерив время задержки между зондирующим импульсом и импульсом, отраженным от подошвы сваи. В табл. 1 приведены результаты измерения скорости продольной волны в трех сваях, упомянутых в разделах 3.1, 3.2 и 3.3. В свае без дефекта и с отражателем в виде диска (см. рис. 3а) скорости продольной

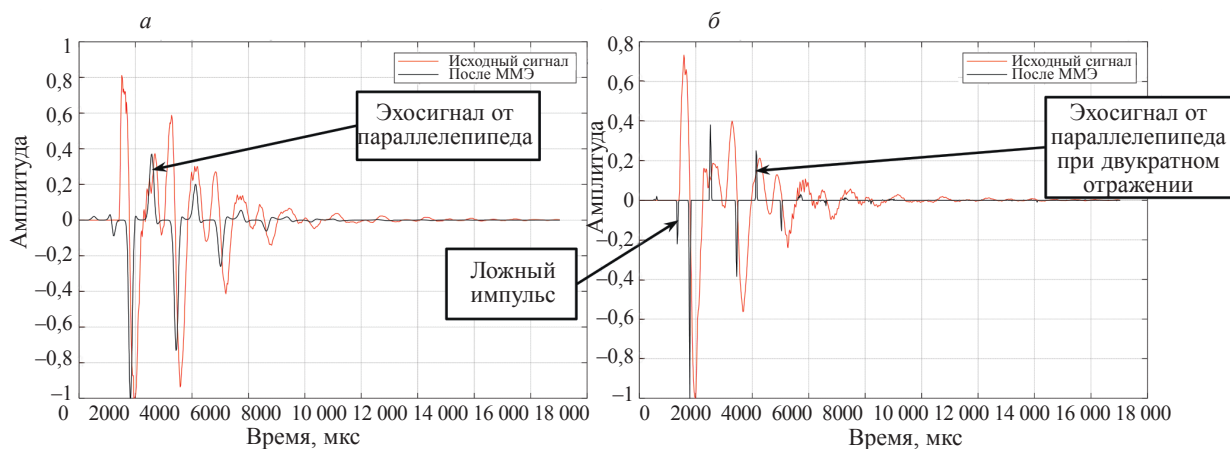


Рис. 7. Результат обработки экспериментального эхосигнала методом МЭ (а) и методом CS (б) при отражении от параллелепипеда высотой 300 мм.

Таблица 1

Результаты измерения скорости в сваях и расстояния до отражателя

	Скорость звука, мм/мкс		Расстояние до отражателя, мм	
	МЭ	CS	МЭ	CS
Свая без дефектов	3,96	3,96		
Свая с отражателем в виде диска	4,02	4,02	1500	1500
Свая с отражателем в виде параллелепипеда	3,61	3,66	1385	1403

волны отличаются друг от друга на 1,5 %. А вот отличие скорости продольной волны в свае с параллелепипедом (см. рис. 3б) составляет заметно большее значение $\approx 7,9$ %. Такое отличие измерений можно объяснить тем, что длина сваи с отражателем в виде параллелепипеда оказалась больше чем 3000 мм, или отличием условий изготовления и затвердевания. Известная скорость звука и время задержки позволяют оценить расстояние до передней грани отражателя. Расстояние до отражателя в виде диска определено достаточно точно и равно 1500 мм для обоих методов сверхразрешения. А вот расстояние до отражателя в виде параллелепипеда в среднем можно оценить как 1400 мм, вместо 1350 по чертежу на рис. 3б. Причина такого отличия, возможно, кроется в неточном размещении параллелепипеда, в неточно определенной скорости продольной волны в свае или в неравномерной скорости звука вдоль сваи.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы:

– Применение метода МЭ позволило повысить разрешающую способность эхосигналов, полученных импакт-методом в бетонной свае длиной 3000 мм, примерно в три раза и обнаружить эхосигналы от искусственных отражателей в виде диска толщиной 100 мм и параллелепипеда высотой 300 мм. Разные фазы импульсов от краев сваи и от искусственного отражателя могут служить дополнительным признаком для его обнаружения.

– Применение метода CS позволило повысить разрешающую способность этих же эхосигналов примерно в десять раз.

– Основной проблемой успешного применения методов МЭ и CS является получение импульсного отклика бетонной сваи при ударе. Предложен способ оценки импульсного отклика по спектру обрабатываемого эхосигнала. Для более корректного решения этой проблемы можно воспользоваться методами слепой деконволюции.

Автор статьи выражает свою благодарность инженеру-исследователю Научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Е.С. Лосевой за постановку задачи и за предоставление для обработки эхосигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flynn K.N., McCabe B.A. Driven cast-in-situ piles installed using hydraulic hammers: Installation energy transfer and driveability assessment // *Soils and Foundations*. 2019. V. 59. No. 6. P. 1946—1959. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.09.003
2. Wightman W.E., Jalinoos F., Sirles P., Hanna K. Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Lakewood, CO. Region 8, USA. 2004.
3. Niederleithinger E. Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment / SAGEEP 2005. Extended Abstracts, Atlanta, USA. 2005.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию / Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
5. Palm M. Single-hole sonic logging. A study of possibilities and limitations of detecting flaw in piles. Master of Science Thesis, KTH, Stockholm, 2012.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // *Геотехника*. 2018. Том X. № 5—6. С. 62—71.
7. Шишкина М.А., Фокин И.В., Тихоцкий С.А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии // *Технологии сейсморазведки*. 2015. № 1. С. 5—21.
8. Лозовский И.Н., Чуркин А.А. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии // *Транспортное строительство*. 2018. № 7. С. 6—9.
9. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю. Проблемы малоглубинной сейсморазведки и георадиолокации в составе инженерно-геологических изысканий. Применение волновых методов для неразрушающего контроля фундаментных конструкций / Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2013.
10. Квятковский Г.И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике. М.: Недра, 1993. С. 90.
11. Amir J.M. Single-Tube Ultrasonic Testing of Pile Integrity / In Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002, Geotechnical special publication Orlando, Florida, USA. 2002.
12. Bateman R.M. Gamma—gamma density logs. Chapter 6. Elsevier, 2020. P. 93—105.
13. ASTM D5882-16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. URL: <https://www.astm.org/d5882-16.html> (дата обращения 27.05.2023).
14. СТО ЭГЕОС 1—1.2—001—2017. Стандарт организации. Применение неразрушающего контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом. URL: <https://aigeos.ru/wp-content/uploads/2020/03/1gt4-2019-muhin-aa-i-dr-tehnicheskie-standarty-1.pdf> (дата обращения 27.05.2023).
15. Прибор диагностики свай «Спектр 4.0». URL: <https://www.interpribor.ru/device-diagnostics-piles-spectrum-4> (дата обращения 27.05.2023).
16. Лозовский И.Н., Лосева Е.С., Сясько В.А. Фильтрация данных сейсмоакустического контроля сплошности свай с использованием непрерывного вейвлет-преобразования // *Контроль. Диагностика*. 2022. № 9. С. 36—45.
17. Loseva E.S., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A., Syasko V.A. Wavelet Analysis for Evaluating the Length of Precast Spliced Piles Using Low Strain Integrity Testing // *Applied Sciences*. 2022. № 12. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/app122110901>
18. Базулин Е.Г. Обработка TOFD-эхосигналов с целью достижения сверхразрешения // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 13—21.
19. Базулин Е.Г., Соколов Д.А. Восстановление ультразвуковых изображений отражателей по неполным данным методом распознавания со сжатием // *Акуст. журн.* 2019. № 4. С. 520—532.
20. Bazulin E.G. Applying Compression Recognition Method to Achieve Superresolution of Echo Signals // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 5. P. 342—354. [Базулин Е.Г. Применение метода распознавания со сжатием для достижения сверхразрешения эхосигналов // *Дефектоскопия*. 2022. № 5. С. 24—36.]
21. Shannon C.R. A mathematical theory of communication // *Bell Systems Technical Journal*. 1948. V. 27. P. 379—423.
22. Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учётом переменной формы эхосигнала // *Научные труды МЭИ*. 2018. № 5. С. 111—119.
23. Miskin J., MacKay D.J.C. Ensemble Learning for Blind Image Separation and Deconvolution. In: Girolami M. (eds.) *Advances in Independent Component Analysis. Perspectives in Neural Computing*. Springer, London, 2000. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0443-8_7
24. Денисов М.С. Алгоритм устойчивой адаптивной сигнатурной деконволюции в технологиях сейсморазведки. URL: <http://www.geo-lab.ru/images/Publics/1.pdf> (дата обращения 27.05.2023).
25. Kosarev E.L. Shannon's superresolution limit for signal recovery // *Inverse Problems*. 1990. 6 (1). P. 55—76. DOI:10.1088/0266-5611/6/1/007
26. Лосева Е.С. Повышение достоверности сейсмоакустического контроля свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах (диссертация). Санкт-Петербургский горный университет. 2023. С. 138.