

АНАЛИЗ СЖАТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН ПРИ КОНТРОЛЕ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

© 2023 г. Мд.М. Паша^{1*}, В.С. Гали¹, Г.Т. Весала¹, Б. Суреш¹

¹Центр тепловидения, Образовательный фонд Конеру Лакимайя, Ваддесварам, Андхра-Прадеш, Индия
*E-mail: urspasha@gmail.com

Поступила в редакцию 18.12.2022; после доработки 31.12.2022
Принята к публикации 13.01.2023

Определение параметров подповерхностных слоев изделий в активной термографии требует высокой скорости съемки, что приводит к сокращению времени экспозиции, избыточности данных, требованию большой пропускной способности, нерациональному использованию ресурсов датчика и памяти. Компрессионное зондирование (КЗ) — это методика получения данных, с помощью которой преодолеваются данные ограничения путем получения сигнала на частотах ниже частоты Найквиста при меньшем количестве измерений, учитывая, что сигнал разрежен в некоторых преобразованных областях и восстанавливается до исходного отклика. В данной работе проверяется эффективность применения КЗ при визуализации частотно-модулированных тепловых волн путем проведения экспериментов на образцах из низкоуглеродистой стали с высоким тепловым откликом с искусственно созданными дефектами. Дискретное косинус-преобразование выбрано в качестве метода априорного разрежения, а ортогональное согласованное преследование используется для восстановления исходного теплового отклика из сжатых изображений. Первоначально проводится анализ выбора оптимального параметра разреженности и количества измерений, затем осуществляется оценка влияния количества измерений на обнаружение дефектов в различных методах постобработки, используемых при частотно-модулированной импульсации. Обнаруженные дефекты и их качественный анализ с помощью оценки отношения сигнал/шум подтвердили пригодность КЗ для эффективного восстановления данных тепловых измерений и, таким образом, улучшения восстановления формы дефектов.

Ключевые слова: активная термография, компрессионное зондирование, дискретное косинус-преобразование, визуализация частотно-модулированных тепловых волн, малоуглеродистая сталь, ортогональное согласованное преследование.

DOI: 10.31857/S0130308223020057, **EDN:** BWSCAS

ВВЕДЕНИЕ

Компрессионное зондирование (КЗ) — это метод получения сигнала, при котором сигнал принимается на частоте ниже частоты Найквиста и обеспечивается точное восстановление при условии, что сигнал разрежен и данные измерений некогерентны [1—3]. Многие сигналы в реальных условиях имеют разреженное представление в области преобразований, в которой очень мало коэффициентов являются значимыми. Небольшой набор случайных измерений может распознать разреженный сигнал. Однако на финальном этапе методы обработки применяются к большим однородным данным, которые интерполируются или восстанавливаются из сжатых результатов измерений. Поэтому КЗ имеет потенциал для получения необходимой информации для точного восстановления сжатых или разреженных сигналов с использованием низкоразмерных нелинейных проекций. КЗ эффективно используется в различных приложениях для получения/обработки сигналов [4], изображений [5] и видео [6].

Подобно этим приложениям, активная термография (АТ) является методом неразрушающего контроля, широко используемым для выявления и определения характеристик дефектов на различных промышленных объектах. АТ использует возмущенные тепловые волны в объекте под действием управляемого оптического импульса для выявления дефектов в виде карты температурного контраста во всем поле, бесконтактным, безопасным и дистанционным способом с помощью инфракрасной камеры [7]. За последние два десятилетия появилось большое разнообразие методов модуляции, адаптированных из технологии RADAR, начиная от быстрых процедур с импульсами высокой пиковой мощности до занимающих много времени схем с кодированием низкой пиковой мощности [8]. Однако АТ генерирует огромные трехмерные видеоданные, содержащие тепловой отклик объекта на модулированный оптический импульс. В связи с этим рекомендуется использовать эффективные методы сжатия или восстановления термографических данных, которые позволяют преодолеть проблемы, связанные с потребностью в памяти и временем контроля. Эти методы извлекают и сохраняют ключевую информацию о подповерхностных дефектах из этих пространственно-временных данных, которые демонстрируют высокое отношение сигнал/шум для дефектов, что в дальнейшем необходимо для количественного анализа [9—19].

Обычный подход к сжатию или восстановлению заключается в извлечении максимального теплового контраста на каждом дефекте и времени его появления из информации во временной области при импульсной термографии [9]. В отличие от этого метода прямого контраста, основанного на одномерном решении уравнения диффузии Фурье, методы абсолютного контраста разработаны для получения контрастных изображений для идентификации подповерхностных дефектов [10]. Другая распространенная практика получения наиболее заметных пространственных особенностей заключается в получении их представления в частотной области путем применения преобразования Фурье к временной информации и выделения амплитудных или фазовых изображений на одной частоте [11]. С другой стороны, обобщение всей последовательности в одно единственное изображение становится возможным при использовании статистических моментов, таких как асимметрия и эксцесс, которые подчеркивают дефекты и неоднородности, присутствующие в информации об образце [12].

Аналогичным образом другие статистические подходы, основанные на анализе данных, такие как анализ главных компонент, восстановление теплового сигнала, анализ независимых компонент, оценка по методу наименьших квадратов и ортонормальное проекционное преобразование, были использованы в качестве методов сжатия термографических данных [13—16]. Здесь сжатие данных распространяется на еще несколько компонент, в отличие от предыдущих, поскольку они являются наиболее значимыми изменениями, присутствующими в тепловых сигналах. Для схем кодированного возбуждения сжатие импульсов на основе согласованного фильтра концентрирует всю энергию теплового отклика на пике главного лепестка, тем самым повышая отношение сигнал/шум [17]. Образ пиковой задержки, сформированный из пиковых значений сжатых профилей, связанных с ними временных задержек с пиком эталонного профиля, обеспечивает улучшенное обнаружение и количественную детализацию дефектов [18]. Вычисление пиковой задержки для количественного анализа требует высокой скорости съемки, что приводит к малому времени экспозиции камеры и низкому качеству изображения [21]. Но, в целом, сжатые изображения импульсов после пика основного лепестка подвергаются анализу для улучшенной визуализации дефектов и разрешения по глубине [19].

Однако количество сгенерированных данных зависит от времени эксперимента (измерения) и скорости съемки при АТ, когда при этом отклик от объекта играет важную роль. Съемка объектов с малым тепловым откликом может производиться на малых скоростях, в то время как материалы с большим тепловым откликом рекомендуется снимать на высоких скоростях [23]. Получение тепловых изображений с высоким разрешением, получаемых при высокоскоростной съемке, приводит к наличию больших объемов данных, которые для хранения требуют большого количества памяти и большой пропускающей способности для передачи от дистанционных контролируемых модулей, таких как беспилотники или роботы, к этапу последующей обработки или к узлу управления. Как объяснялось ранее, компрессионное зондирование (КЗ) облегчает сбор информации на частотах ниже частоты Найквиста и дальнейшее восстановление для последующей обработки. В недавнем прошлом в нескольких исследованиях для сжатия информации при АТ использовали компрессионное зондирование или особенности разреженного представления термографических данных [21—23].

Авторы в [21] подчеркнули необходимость в высокой скорости съемки, соответственно малом времени экспозиции, приводящем к низкому качеству термограмм, и поэтому предложили метод неоднородной регистрации данных при визуализации частотно-модулированных тепловых волн, стимулированных свечением светодиода. Собранная таким образом информация занимает половину памяти, как и фактические данные с тем же разрешением, а восстановленная последовательность с помощью метода кубической сплайн-интерполяции восстанавливает сжатые результаты измерений для дальнейшей обработки. В [22] они применили этот метод к квадратичному частотно-модулированному импульсу, учитывая возможность разреженного представления временных тепловых профилей, как было сказано ранее, и предложили в [22] оптимизированный алгоритм разреженного восстановления. С другой стороны, авторы применяли итеративное совместное разрежение для получения фототермических изображений со сверхразрешением, учитывая разреженность дефектов в пространственной области [23].

В этой статье подтверждается применение КЗ при визуализации частотно-модулированных тепловых волн путем проведения экспериментов на образцах из малоуглеродистой стали с искусственно смоделированными дефектами плоского дна разного размера с различной глубиной. В качестве матрицы априорной разреженности выбрано дискретное косинус-преобразование (ДКП), а для восстановления исходного теплового отклика по результатам сжатия используется ортогональное согласованное преследование. В данном случае КЗ используется для измерения временных вариаций теплового отклика образца. Эффективная способность метода КЗ к восстановлению

первоначально анализируется на временном тепловом профиле, чтобы определить оптимальный уровень разреженности и количество измерений. Эффективность восстановления оценивается с помощью среднеквадратичной ошибки и отношения сигнал/шум (ОСШ) между исходным и восстановленным методом КЗ тепловым профилем. Результат восстановления проверяется с помощью среднеквадратичной ошибки и отношения сигнал/шум (ОСШ) между исходным и восстановленным с помощью КЗ тепловым профилем. Затем устанавливается уровень разреженности и варьируется количество измерений для определения подходящего минимального количества измерений, необходимого для эффективного восстановления исходных тепловых данных для выбранного уровня разреженности. Далее обычные методы обработки, такие как фаза преобразования Фурье [11, 12], сжатие импульса [17, 19], метод главных компонент [13] и **Фаза Chirp Z-преобразования** [24, 25], применяются к восстановленным с использованием КЗ тепловым данным и сравниваются с исходными тепловыми данными. Это качественное сравнение, подкрепленное наблюдаемым увеличением ОСШ дефектов, позволило сделать вывод об оптимальном уровне разреженности, количестве измерений и, наконец, о пригодности КЗ в АТ.

Остальная часть статьи организована следующим образом. В разделе II представлен краткий обзор метода КЗ с алгоритмами восстановления на основе минимизации, подходящими для термографии. В разделе III приводится выбор материала и детали экспериментов, а в разделе IV — результаты и анализ выбора правильного уровня разреженности и количества измерений для эффективного восстановления тепловых данных КЗ. Наконец, раздел V завершает статью кратким комментарием о полученных результатах и перспективах на будущее.

КОМПРЕССИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКТИВНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Сжатое зондирование — это новый способ получения сигнала, который позволяет получать сигнал с меньшей частотой дискретизации и обеспечивает точное восстановление при условии, что сигнал разрежен, а данные измерений некогерентны. Многие сигналы в реальных приложениях имеют разреженное представление в области преобразования, в которой очень мало коэффициентов являются значимыми, следовательно, сигнал КЗ является пригодным. Теория метода КЗ была впервые предложена в 2006 году в двух новых работах [1] и [2], с тех пор в этой области было проведено много исследований.

Под задачей восстановления КЗ можно понимать задачу оценки разреженного сигнала, который наилучшим образом представляет сжатые измерения. Математически процесс измерения КЗ представим следующим образом [1]:

$$y = \Phi x, \quad (1)$$

где x — входной сигнал длины N , который должен быть сжат; Φ — матрица измерений $M \times N$, а y — сжатый вектор измерений длины $M \ll N$. Процесс компрессионного сжатия проиллюстрирован на рис. 1. На основе этих измерений y , сигнал x может быть восстановлен с учетом Φ , если x разрежен по базису Ψ :

$$x = \Psi a, \quad (2)$$

где a — K -разреженный сигнал, т.е. он имеет наибольшее K ненулевых элементов. Из уравнений (1) и (2):

$$y = \Theta a, \quad (3)$$

где $\Theta = \Phi\Psi$.

Следовательно, используя модель, показанную на рис. 1, восстановление разреженного сигнала x может быть выполнено путем решения уравнения (1). Поскольку число измерений M намного меньше, чем размерность N сигнала x , эта ситуация является недоопределенной, и восстановление x по y является плохо поставленной задачей и имеет множество решений. При этом условии единственное решение может быть найдено путем решения оптимизационной задачи [1—6]:

$$\hat{a} = \operatorname{argmin} \|a\|_1 \text{ subject to } \Theta a = y, \quad (4)$$

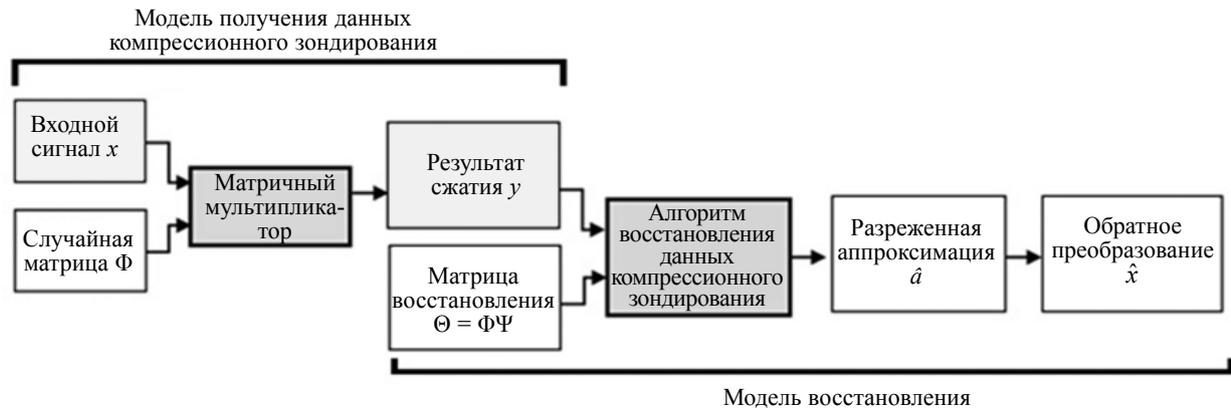


Рис. 1. Модель получения и восстановления сигналов при компрессионном зондировании.

где \hat{a} — оценка разреженного вектора a ; y — сжатые данные; $\|a\|_1$ — l_1 -норма a и является суммой абсолютных величин a . Из \hat{a} путем применения обратного преобразования с использованием базисов Ψ находится \hat{x} (оценка входного сигнала x). Решение задачи минимизации l_1 -нормы является оптимизационной задачей, которая может быть эффективно решена с помощью линейного программирования.

Поскольку количество измерений y много меньше входного сигнала x , матрица измерений Φ должна быть тщательно продумана. Для K -разреженного сигнала она должна удовлетворять свойству ограниченной изометрии (СОИ), чтобы получать максимум информации о сигнале в сжатой форме. Кроме того, он должен быть некогерентным с базисами Ψ для того, чтобы включить как можно больше информации в минимум измерений [26, 27]. Вышеуказанная проблема может быть решена [26, 27]. В [28] было показано, что количество измерений M для успешного восстановления сигнала задается следующим образом:

$$M \geq 0 \left(k \log \frac{N}{K} \right). \quad (5)$$

Случайные матрицы, такие как гауссова или матрица Бернулли [29], удовлетворяют RIP и, как показано, являются некогерентными с любым из базисов Ψ . Теория компрессионного зондирования предложила множество способов решения проблемы восстановления разреженных сигналов. Два основных алгоритмических подхода к решению задачи минимизации l_1 -нормы в уравнении (4) — это алгоритмы выпуклой оптимизации и жадные алгоритмы. Методы выпуклой оптимизации, такие как поиск базиса шумоподавления (ПБШП), предоставляют разреженные решения за счет очень малого количества измерений, но их вычислительная сложность очень высока [24]. Жадные методы являются вычислительно быстрыми по сравнению с выпуклой оптимизацией и восстанавливают разреженный сигнал итеративно [4]. Самыми известными жадными алгоритмами являются согласованное преследование (СП), ортогональное согласованное преследование (ОСП), согласованное преследование с компрессионным сжатием (СПКС) и итеративная жесткая пороговая обработка (ИЖПО). ОСП итеративно восстанавливает разреженный сигнал и вычисляет улучшенную оценку разреженного сигнала до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки. На каждом шаге ОСП выбирает столбец, который в значительной степени коррелирует с остатком. Этот столбец добавляется к выбранному множеству, алгоритм обновляет остаток путем проецирования наблюдений на это множество и продолжает итерацию. Он прост и быстр в реализации по сравнению с ПБШП.

В данном случае КЗ применялось в частотно-модулированной термографии для исследования подповерхностных дефектов в образце из низкоуглеродистой стали. В целом, известно, что временной тепловой профиль или термографические данные являются разреженными в некоторых областях преобразования [9—16], т.е. лишь часть коэффициентов в области преобразования могут его представить. Преобразование Фурье является наиболее распространенным методом, когда тепловой профиль представлен в виде комбинации действительных и мнимых компонентов в частот-

ной области. Однако в этом случае дискретное косинус-преобразование (ДКП) рассматривается в виде априорной разреженности, поскольку в этом методе используются только вещественные числа и длина вдвое меньше, чем в БПФ [32]. Поскольку в ДКП комплексные члены игнорируются, оно требует гораздо меньше памяти для хранения и низкой пропускной способности для передачи сжатых измерений, а также задача восстановления становится проще и менее сложной. На этапе восстановления в конкретном случае используется алгоритм ОСП, поскольку он быстрый и менее сложный [24]. Блок-схема алгоритма ОСП показана на рис. 2.

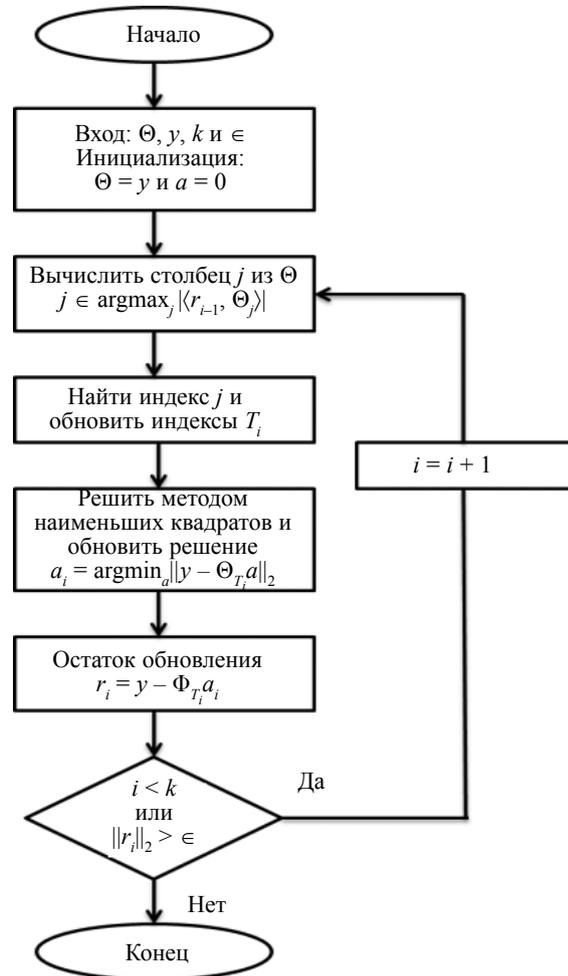


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ОСП.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью работы является изучение применимости КЗ в АТ для идентификации подповерхностных дефектов с ограниченным числом измерений для объектов с быстрым откликом. Поэтому эксперименты проводятся на образце из низкоуглеродистой стали с искусственными плоскими донными отверстиями различных размеров на разных глубинах. Схематическое расположение и фронтальный вид испытуемого образца представлены на рис. 3а и б соответственно. Перед началом эксперимента передняя поверхность образца покрывается черной краской с излучательной способностью 0,95 для получения равномерной излучательной способности по всей поверхности. Во время эксперимента образец возбуждается оптическим импульсом мощностью 2 кВт с частотной модуляцией в диапазоне от 0,01 до 0,1 Гц, освещаясь набором галогенных ламп в течение 100 с. Относительный тепловой отклик записывается с помощью тепловизора FLIR

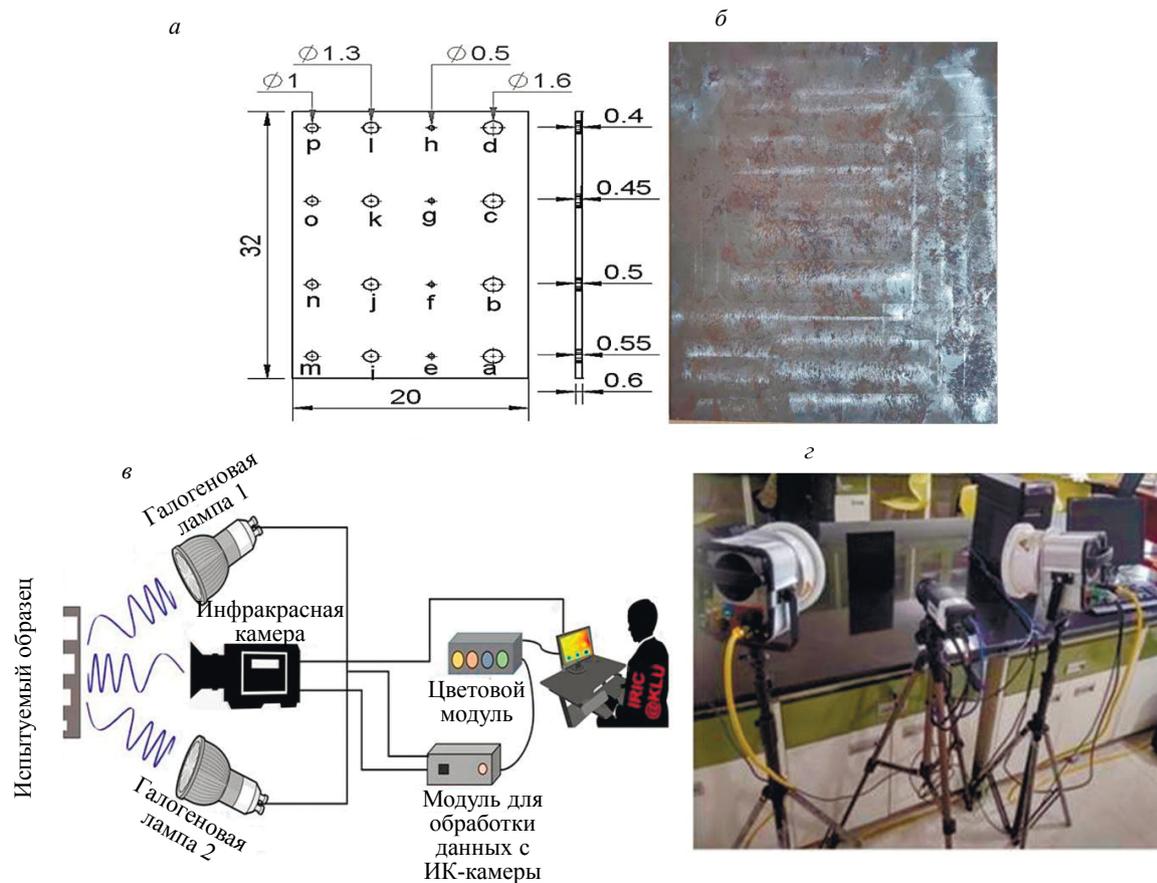


Рис. 3. Схематичное расположение (все размеры в см) (а); фронтальный вид испытуемого образца (б); схема установки (в); экспериментальная установка АТ (г).

A655SC. Формирователь изображения в инфракрасной области спектра работает в спектральном диапазоне 7—14 мкм, осуществляя съемку со скоростью 25 кадров/с. Схематическая и экспериментальная установка активной термографии показаны на рис. 3в и г соответственно. Полученный тепловой отклик анализируется на применимость КЗ путем сравнения различных методов обработки исходного и восстановленного теплового отклика, как указано в следующем разделе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученный тепловой отклик образца из углеродистой стали представляет собой видеоряд, записываемый каждые 0,04 с в течение 100 с, в результате чего получается 2500 кадров, каждый из которых имеет разрешение 235×174 пикселей после удаления фона, отличного от испытуемого образца. Каждый пиксель во всех кадрах представляет собой фактический отклик испытуемого образца на подаваемый модулированный оптический стимул, известный как временной тепловой отклик. Эта исходная информация представляет собой статическую и динамическую составляющие, где первая — это среднее повышение температуры из-за постоянного смещения, добавляемого к возбуждению для устранения отрицательного цикла нагрева импульса, а вторая — это фактический и желаемый отклик образца. Таким образом, обычные методы обработки включают этап предварительной обработки, на котором с помощью соответствующих методов обработки удаляется статический компонент и извлекается выбранный динамический компонент. Однако в данном контексте КЗ собирает тепловую информацию на частоте ниже Найквиста, что приводит к очень малому количеству измерений исходного теплового отклика. Следовательно, предложенный подход КЗ применяется к профилю одного пикселя в бездефектной области до и после обработки для наблюдения за оценочным распределением k -разреженных коэффициентов.

Как было сказано ранее, в качестве разреженной матрицы коэффициентов выбрано дискрет-

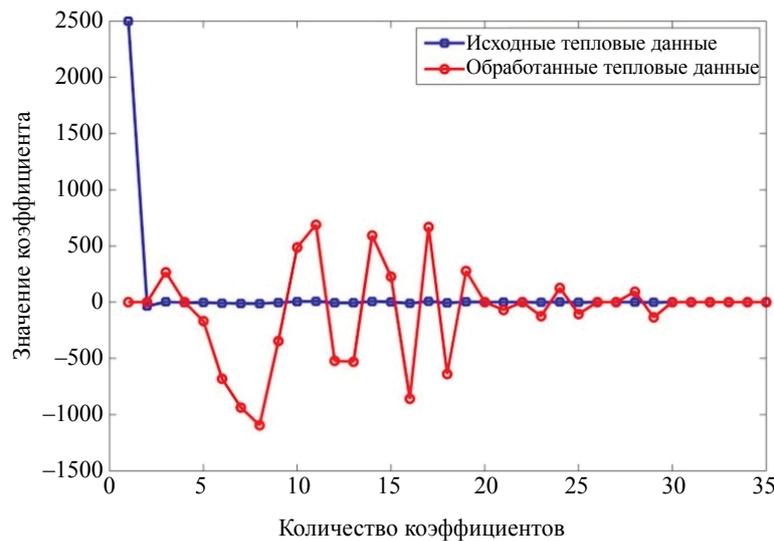


Рис. 4. Оценочные разреженные коэффициенты для исходным и обработанных данных тепловых откликов.

ное косинус-преобразование (ДКП), а в качестве алгоритма восстановления с регуляризацией по l_1 -норме используется ортогональное согласованное преследование (ОСП). Хорошо известно, что ДКП выделяет большую часть всех данных в первых нескольких компонентах; разреженность выбрана равной 35, а количество измерений — 250, что составляет 10 % от фактической длины теплового профиля. Первые несколько оценочных разреженных коэффициентов для исходного и обработанного теплового профиля показаны на рис. 4. Поскольку ДКП получает частотные компоненты теплового профиля, коэффициенты разреженности представляют собой то же самое, что и соответствующие значения величины. Они показывают, что средний уровень подъема в исходном тепловом профиле обусловлен постоянной составляющей. Следовательно, он выделяет большую часть всех данных и малую часть данных, близких к нулю для других коэффициентов. С другой стороны, скорректированный тепловой профиль обладает только динамической составляющей, которая является фактической реакцией образца на заданный стимул. Следовательно, значительная энергия распределяется по первым нескольким компонентам, охватывающим спектр импульса. Выбранное значение разреженности равно 35, так как после него значения коэффициентов становятся полностью нулевыми. Однако эти оптимальные параметры были выбраны после серии исследований исходных и обработанных тепловых откликов, при этом один из этих параметров (разреженность и количество измерений) оставался постоянным, а другой варьировался.

В первую очередь, число измерений задано равным 350, а уровень разреженности варьируется от 5 до 55 с шагом в 15 элементов. Исходные необработанные и обработанные тепловые профили (выделены красным цветом), а также восстановленные сигналы КЗ для различных уровней разреженности показаны на рис. 5а и б соответственно. Соответствующий спектр представлен на рис. 5в, где каждый цвет обозначает соответствующий уровень разреженности, как указано в легенде. Из рисунка видно, что очень малые уровни разреженности (5) не обеспечивают эффективного восстановления теплового профиля, поскольку они пропускают фактические коэффициенты ДКП, которые покрывают спектр импульса, что также видно из спектра. С другой стороны, более высокие уровни разреженности (45 и 55) восстанавливают шум в тепловом профиле, поскольку эти коэффициенты покрывают высокочастотные составляющие в ДКП, которые содержат шум в тепловых профилях. Таким образом, средние уровни разреженности (такие как 25 и 35), продемонстрировали эффективное восстановление теплового профиля, обозначенного черным и голубым цветом на рисунке соответственно. Однако наблюдение огибающей и спектра показывает, что 35-элементная разреженность подходит для эффективной реконструкции теплового профиля.

Во-вторых, уровень разреженности установлен на 35, а количество измерений с шагом 50 ва-

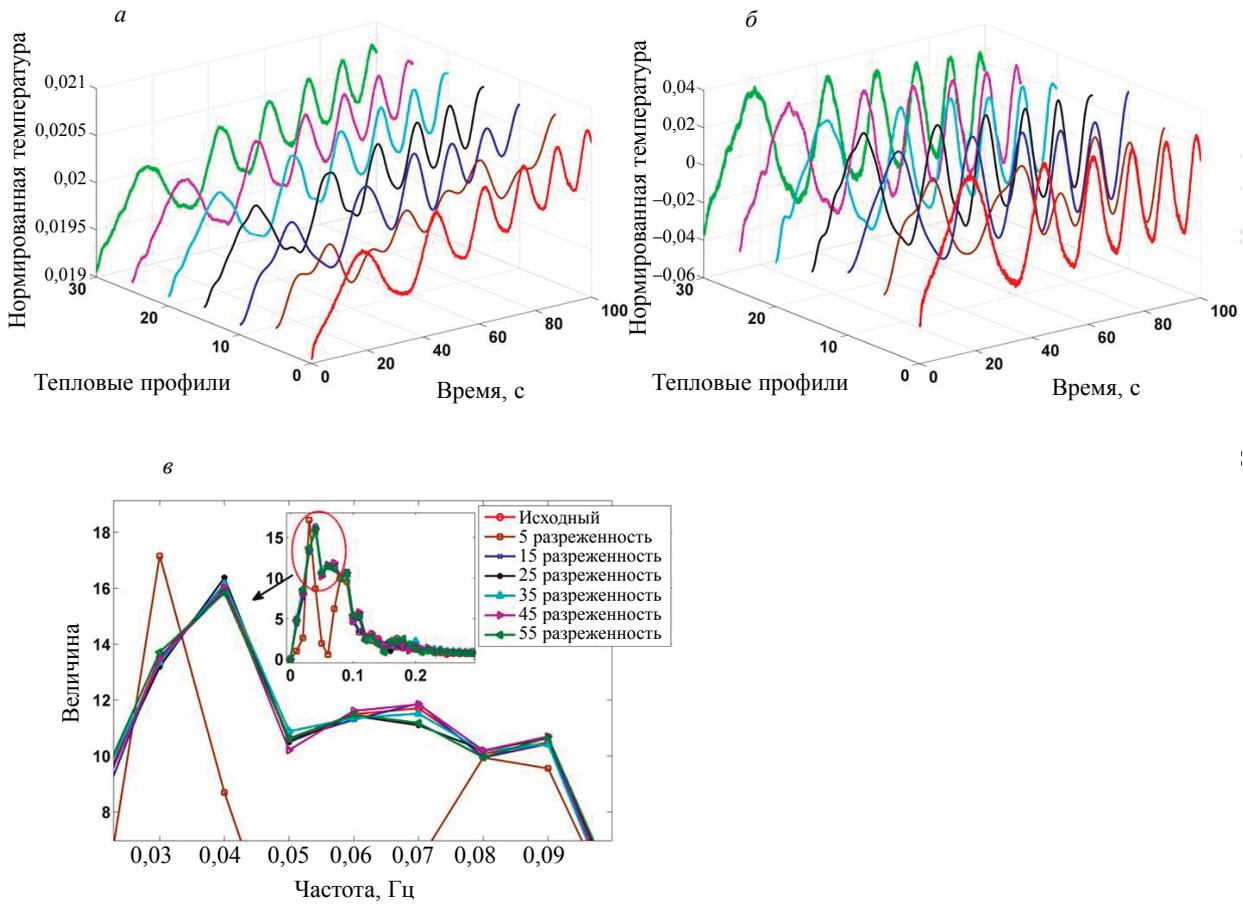


Рис. 5. Исходные (красные) и восстановленные тепловые профили для 350 измерений при различных уровнях разреженности: а — исходные; б — обработанные тепловые профили; в — их спектр.

рируется от 250 до 500, что составляет от 10 до 20 % от фактических измерений. Исходные необработанные и обработанные тепловые профили (выделены красным цветом) и восстановленные по методу КЗ тепловые профили для различных измерений показаны на рис. ба и б соответственно. Соответствующий спектр представлен на рис. бв, где каждый цвет обозначает соответствующее количество измерений, как указано в легенде. В обоих случаях видно, что в восстановленных тепловых профилях устраняется шум, а также наблюдается, что огибающая сигнала нарушается при меньшем количестве измерений и достигает своей нормальной формы после 350 измерений. В дополнение к этим наблюдениям, эффективное восстановление для различных уровней разреженности и измерений количественно оценивается с помощью среднеквадратичной ошибки (СКОш) и отношения сигнал/шум (ОСШ), которые определяются как:

$$\text{СКОш} = \frac{(T_{\text{восст}} - T_{\text{исх}})^2}{T_{\text{исх}}^2}, \quad (6)$$

$$\text{ОСШ} = 10 \cdot \log \left(\frac{T_{\text{восст}}^2}{(T_{\text{исх}}^2 - T_{\text{восст}}^2)} \right). \quad (7)$$

В табл. 1 показаны соответствующие значения СКОш и ОСШ, полученные для различных уровней разреженности и количества измерений для необработанных и обработанных тепловых профилей с использованием КЗ. Из табл. 1 видно, что значения СКОш и ОСШ очень высоки для исходных тепловых профилей, восстановленных с помощью КЗ, по сравнению с обработанными-

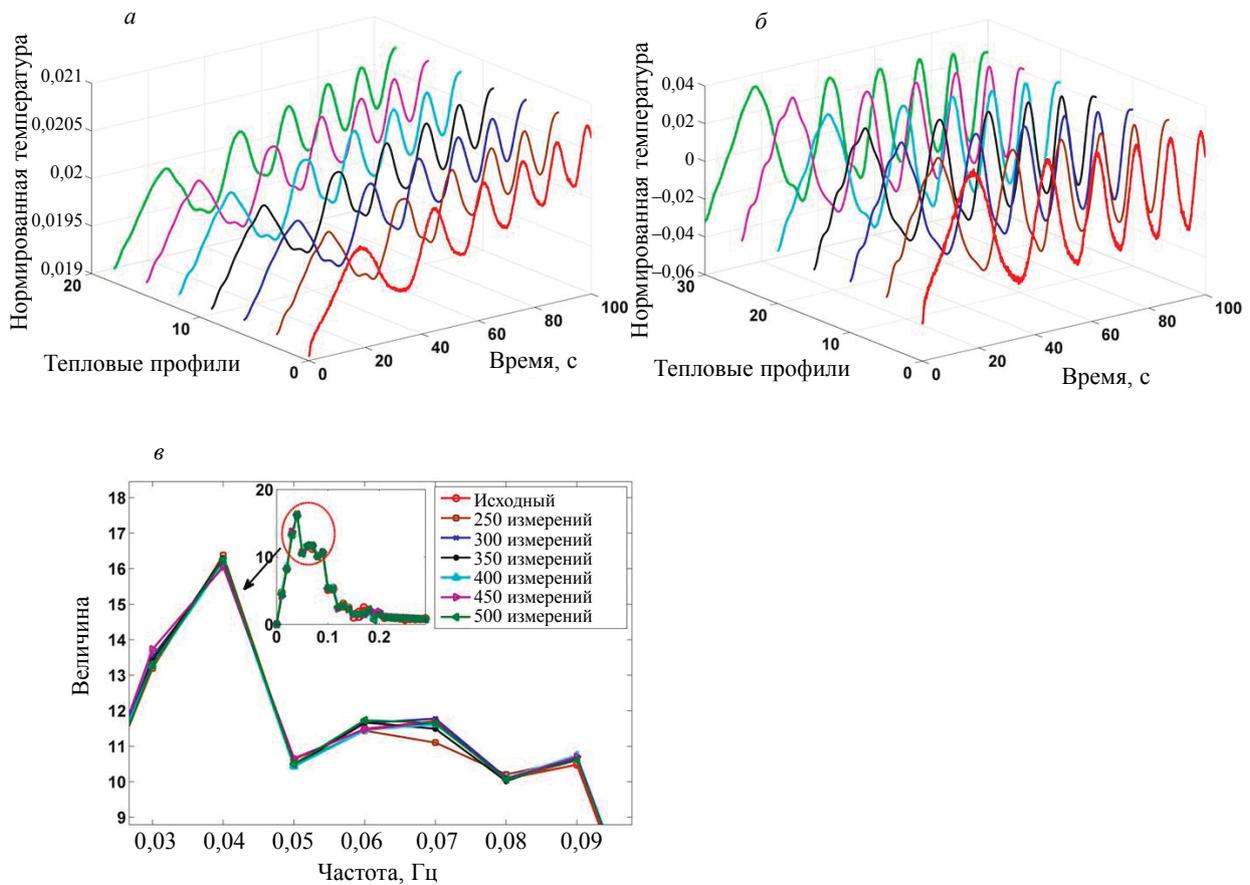


Рис. 6. Исходные (красные) и восстановленные тепловые профили при 35-элементной разреженности и различном количестве измерений:
a — исходные; *б* — обработанные тепловые профили; *в* — их спектр.

Таблица 1

СКОш и ОСШ восстановленных тепловых профилей (исходных и обработанных) при различной степени разреженности и различном количестве измерений

Тепловой профиль		Исходный		Обработанный	
Параметр	Значение	СКОш, $\times 10^{-7}$	ОСШ, дБ	СКОш, $\times 10^{-2}$	ОСШ, дБ
Разреженность	5	777,09	83,94	40,96	12,52
	15	86,9	107,67	2,88	17,73
	25	15,31	119,37	0,82	28,58
	35	8,86	120,52	0,57	35,13
	45	7,4341	125,36	0,67	37,11
	55	9,8865	121,79	0,84	34,11
Количество измерений	250	12,53	119,37	0,65	31,28
	300	12,34	118,87	0,53	34,48
	350	12,36	122,07	0,51	35,85
	400	12,39	116,69	0,52	33,26
	450	12,17	120,66	0,48	37,33
	500	12,30	119,08	0,47	33,44

ми, что в основном обусловлено средним ростом температуры. Также замечено, что степень разреженности существенно влияет на СКОш и ОСШ, поскольку увеличение степени разреженности

снижает СКОш и повышает ОСШ до определенных коэффициентов разреженности как для необработанных, так и для обработанных тепловых профилей. Это помогает выбрать оптимальный параметр разреженности. С другой стороны, количество измерений в меньшей степени изменяет эти параметры, а случайность в измерениях приводит к ошибочному распределению, что затрудняет выбор оптимального количества измерений. Таким образом, правильный выбор количества измерений подтверждается применением методов постобработки восстановленных тепловых данных КЗ и сравнением с результатами исходных тепловых данных.

Фаза преобразования Фурье (ПФ-фаза)

При использовании ПФ-фазы каждый профиль пикселя в поле зрения обрабатывается с помощью преобразования Фурье, а соответствующая фаза перемещается в соответствующее место для формирования фазограмм. Для анализа выбирается подходящая частотная составляющая, которая выявляет детали дефекта на соответствующей фазограмме [11 и 13]. Та же процедура проводится для восстановленных методом КЗ тепловых данных образца из низкоуглеродистой стали для всех различных измерений и исходных обработанных тепловых данных. Фазограммы, наблюдаемые на частоте 0,07 Гц для всех восстановленных методом КЗ тепловых данных и исходных тепловых данных, представлены на рис. 7а—г с цветовой картой, обозначающей фазу соответственно. Высокие значения фазы в правом верхнем углу, указывающие на дефект, обусловлены царапиной на передней поверхности образца.

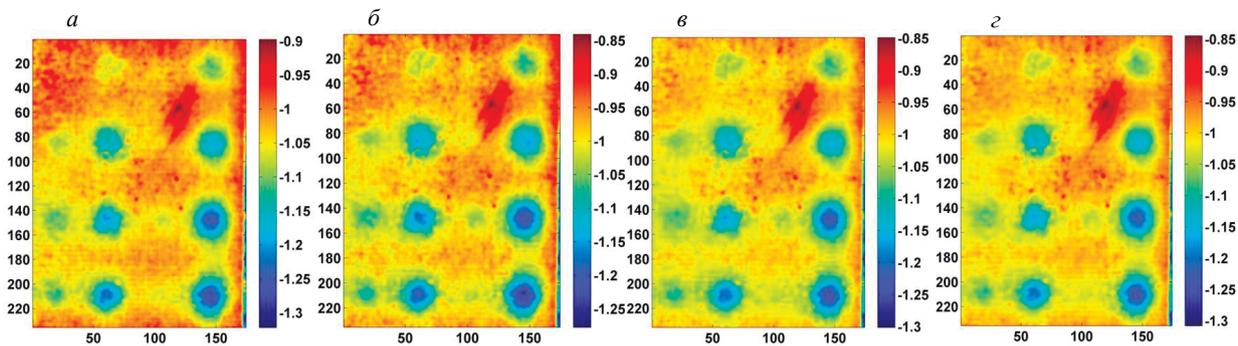


Рис. 7. Фазограммы при 0,07 Гц для восстановленных методом КЗ тепловых данных: а — 250; б — 350; в — 500 измерений; г — исходные тепловые данные.

Видно, что фазограммы восстановленного теплового отклика практически повторяют фазограммы, полученные из исходного теплового отклика. Однако, наблюдая за значениями фазы и контраста, очевидно, что большее количество измерений привело к неоднородности в бездефектной области, что ограничивает идентификацию дефектов малого диаметра (5 мм). Но при меньшем количестве измерений устранение избыточных высокочастотных компонентов способствует минимизации неоднородных бездефектных областей и идентификации дефектов малого размера с лучшими границами. Сравнение с исходной фазограммой тепловых данных показывает, что измерения в диапазоне от 300 до 400 воспроизводят фактическую фазограмму с незначительными различиями в значениях фазы. Фазограммы восстановленных тепловых данных 350 измерений в указанном диапазоне представлены на рис. 7б, демонстрируя фазовый контраст, аналогичный фазограмме исходных данных, приведенной на рис. 7г.

Сжатие импульса

Сжатие импульса — метод обработки во временной области, при котором профиль каждого пикселя в поле зрения кросс-коррелирует с эталонным тепловым профилем на бездефектной области и профиль корреляции перестраивается в соответствующем месте пикселя для формирования куба коррелограммы [17, 19]. Кросс-корреляция концентрирует всю энергию в главном лепестке профиля, тем самым минимизируя шум, добавляемый к тепловым данным во время эксперимента.

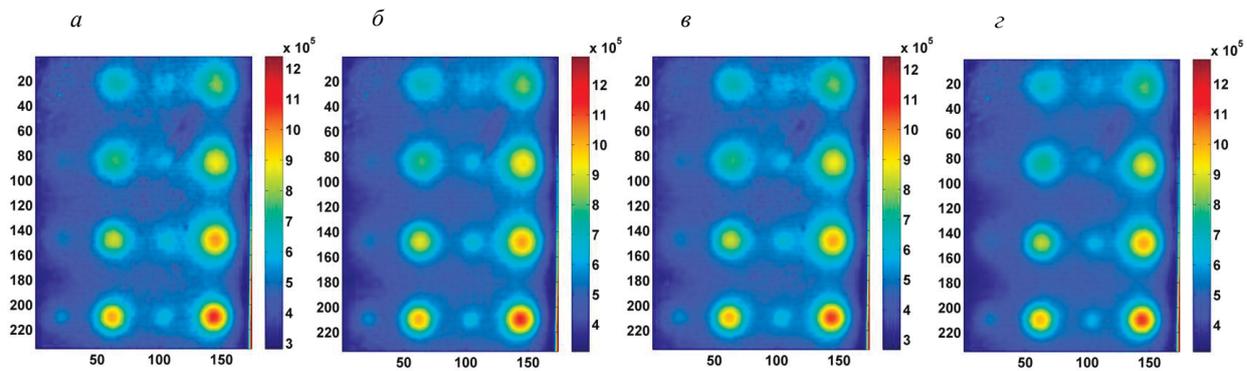


Рис. 8. Изображения контраста корреляции на 3,44 секунде восстановленных тепловых данных методом КЗ: *a* — 250; *b* — 350; *v* — 500 измерений; *z* — исходные тепловые данные.

Изображение контраста пика главного лепестка дает детали дефекта, а задержка в появлении пика по отношению к пику эталонного профиля используется для количественного анализа [17].

Изображение корреляционного контраста после появления пика, что аналогично латеральной диффузии тепла при импульсном стимуле, дает лучший контраст дефекта, чем пиковый контраст [19]. Таким образом, изображение коэффициента корреляции на 3,44 с для всех восстановленных тепловых данных с помощью КЗ различных измерений и исходных тепловых данных представлено на рис. 8*a*—*z*, где цветовая полоса обозначает коэффициент корреляции соответственно. По сравнению с ПФ-фазой, ПК разрешил почти все дефекты с меньшей неоднородностью фона и лучшим контрастом для дефектных и бездефектных областей. Из рисунка также видно, что изображения коэффициента корреляции тепловых данных, восстановленных с помощью КЗ, для всех измерений демонстрируют очень незначительные отклонения от оригинала. Однако при ближайшем рассмотрении, дефекты, идентифицированные на корреляционных изображениях при 300—400 измерениях, отличаются незначительно лучшими границами дефектов и лучшим контрастом для дефектов малого размера (5 мм). Например, на рис. 8*b* показаны корреляционные изображения восстановленных тепловых данных 350 измерений. С другой стороны, меньшее и большее количество измерений приводит к сохранению латеральной диффузии на границах дефектов, что приводит к неровным краям дефектов.

Метод главных компонент (МГК)

МГК — это метод статистической обработки, который создает низкоразмерное представление посредством линейной проекции, известной как главные компоненты, на основе вариаций данных высокой размерности. Вариации располагаются в порядке убывания таким образом, что первые несколько главных компонент представляют собой наиболее значимые вариации данных. МГК может быть получена из разложения по собственным значениям или разложения по сингулярным значениям (РСЗ). МГК учитывает как временные, так и пространственные изменения температуры и создает низкоразмерное представление, которое обладает наиболее значимыми характеристиками данных, что приводит к улучшению обнаружения дефектов [13, 19]. В данном контексте, третья главная компонента (ГК) всех тепловых данных, восстановленных методом КЗ, различных измерений и исходных тепловых данных представлен на рис. 9*a*—*z* с цветовой полосой, обозначающей значение ГК соответственно. Видно, что ГК исходных данных имеет много отличий от ГК тепловых данных, восстановленных с помощью КЗ.

Это связано с тем, что МГК учитывает временные и пространственные отношения профилей пикселей, в отличие от предыдущих методов, которые используют только временные изменения тепловых данных. Следовательно, МГК эффективно сохраняет пространственную связь между пикселями, что минимизирует неоднородный фон в бездефектной области и идентифицирует дефект диаметром 10 мм на глубине 2 мм в левом верхнем углу образца, который едва заметен в других подходах. Однако количество измерений влияет на МГК таким образом, что увеличение количества измерений приводит к неоднородности по краям образца и затрудняет идентификацию дефектов диаметром 10 мм. Для проверки этого количество КЗ-измерений было подобрано равным фактическому размеру тепловых данных (2500) и наблюдалась та же ГК, что и в исходных данных, как показано на рис. 9*z*.

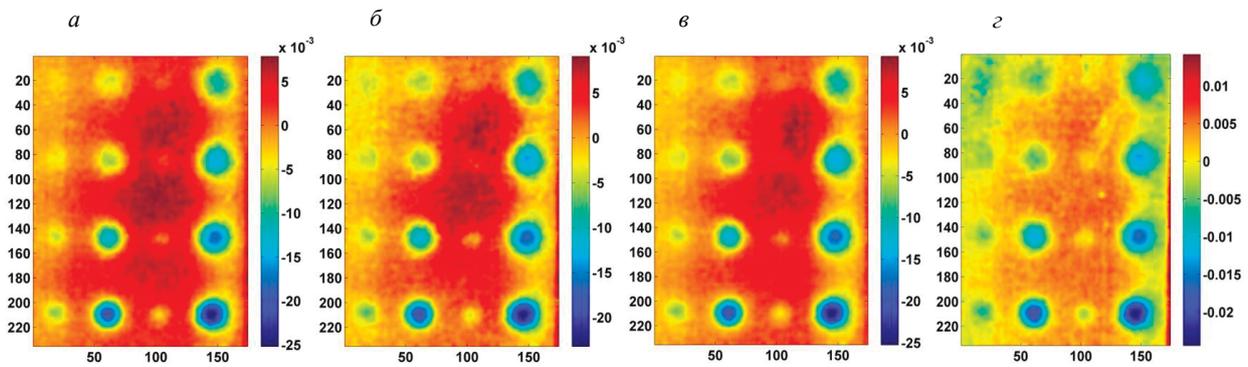


Рис. 9. Главная компонента тепловых данных, восстановленных с помощью КЗ:
a — 250; *б* — 350; *в* — 500 измерений; *г* — исходные тепловые данные.

Фаза Chirp Z-преобразования (CZT-фаза)

CZT-фаза является частным случаем и позволяет преодолеть ограниченную способность преобразования Фурье к частотному разрешению путем увеличения полосы выбранного диапазона частот и увеличения числа выборок до целой степени 2. В недавнем прошлом наблюдалось развитие возможностей CZT-фазы в схемах кодированной стимуляции, поскольку она обеспечивает глубинное разрешение, количественную оценку и определение параметров дефектов [25, 26]. В данном случае фактический отклик образца, представляющий информацию о дефектах в FT-фазе, наблюдается в диапазоне от 0,07 до 0,09 Гц в трех образцах с разрешением всего 0,01 Гц. Теперь CZT применяется к каждому тепловому профилю, увеличивая масштаб в полосе от 0,065 до 0,085 Гц, увеличивая количество образцов до 4096 с разрешением каждого образца $0,48 \times 10^{-6}$ Гц. Соответствующая фаза переставляется в соответствующее место и наблюдаются фазограммы для улучшения обнаружения дефектов. Соответствующая фазограмма на частоте 0,0668 Гц для всех тепловых данных, восстановленных методом КЗ различных измерений, и исходных тепловых данных представлена на рис. 10*a—г* с цветовой полосой, обозначающей значение фазы соответственно. Первоначально, по сравнению с ПФ-фазой, наблюдаемой на частоте 0,07 Гц, фазограммы CZT значительно устраняют фоновые помехи до определенного уровня. При наблюдении CZT фазограмм тепловых данных, восстановленных методом КЗ, видно, что фоновая неоднородность постепенно уменьшается, что отрицательно сказывается на разрешении дефектов малого размера (диаметром 5 мм). Тем не менее, это привело к значительному контрасту для данных КЗ измерений от 300 до 400, среди которых лучшая фазограмма при восстановленных тепловых данных 350 измерений, как показано на рис. 10*б*.

Из всего первичного анализа тепловых профилей и карт дефектов, наблюдаемых с помощью методов обработки, делается основной вывод, что измерения в диапазоне от 300 до 400 подходят для эффективного восстановления тепловых данных с помощью КЗ. В дополнение к этому

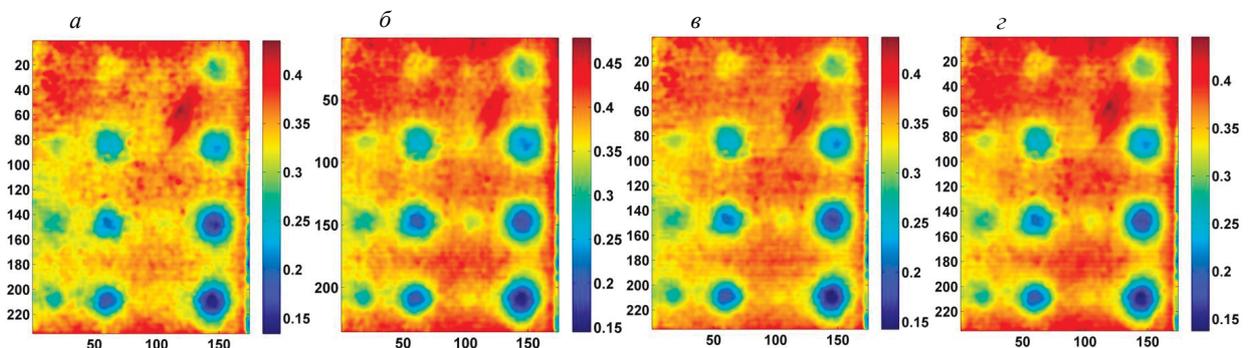


Рис. 10. CZT-фазограмма при 0,0668 Гц тепловых данных, восстановленных методом КЗ:
a — 250; *б* — 350; *в* — 500 измерений; *г* — исходные тепловые данные.

первичному подтверждению количественный анализ усиления сигнала дефектов дополнительно подтверждает применимость КЗ в АТ, что достигается путем вычисления отношения сигнал—шум дефекта ($ОСШ_{\text{деф}}$). $ОСШ_{\text{деф}}$ отличается от $ОСШ$, упомянутого выше, здесь сигнал рассматривается как средняя разница между дефектом и бездефектным участком, шум принимается как стандартное отклонение бездефектной (б/д) области, а $ОСШ_{\text{деф}}$ — это отношение между ними, заданное следующим образом:

$$ОСШ_{\text{деф}} = 20 \cdot \log \left(\frac{\mu_{\text{деф}} - \mu_{\text{б/д}}}{\sigma_{\text{б/д}}} \right). \quad (8)$$

Рассматриваются дефекты диаметром 13 и 5 мм на глубине 0,5 мм, $ОСШ$ вычисляется для всех методов обработки и результат представлен на рис. 11а и б соответственно. Видно, что МГК превосходит все другие методы обработки, так как он обеспечивает улучшенный сигнал дефекта с последующим сжатием импульса. Основное преимущество МГК заключается в том, что КЗ, восстановленное из нескольких коэффициентов ДКП, представляет собой фактический отклик образца в данной полосе воздействия импульса с гораздо меньшим уровнем шума. И применение МГК к этим данным извлекает наиболее значимые особенности с пространственной и временной корреляцией, что приводит к дефектам с лучшим $ОСШ$. С другой стороны, хотя СЗТ-фаза лучше обнаруживает дефекты, чем ПФ-фаза, обе они страдают от помех в звуковых областях, что влияет на $ОСШ$ дефектов, который ниже, чем у других методов. Тем не менее из графиков $ОСШ$ видно, что большинство значений $ОСШ$ тепловых данных, восстановленных методом КЗ, приближаются к исходным данным после 300 измерений.

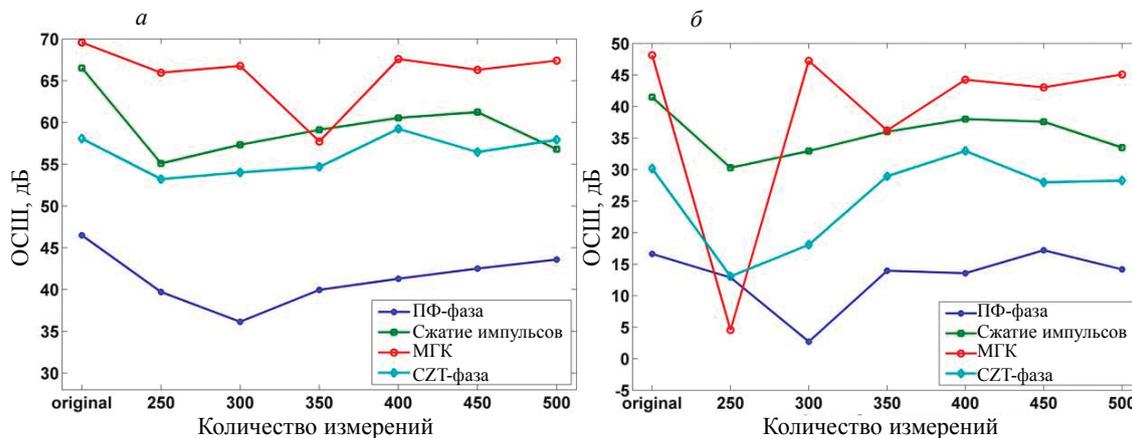


Рис. 11. $ОСШ$ дефектов с диаметрами 13 мм (а) и 5 мм (б) для различных методов обработки исходных и восстановленных методом КЗ тепловых профилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье анализируется применимость компрессионного зондирования в изображении частотно-модулированных тепловых волн с целью анализа пригодности для записи теплового отклика на частоте ниже частоты Найквиста и достижения лучшего обнаружения дефектов. Поскольку металлические объекты с высоким откликом требуют высокой скорости съемки в АТ, эксперимент проводится на образце из малоуглеродистой стали, а полученные тепловые данные подвергаются компрессорному зондированию. Используя ДКП в качестве априорного разрежения и ОСП в качестве алгоритма восстановления, тепловые данные сжимаются и восстанавливаются при различных уровнях разреженности и различных количествах измерений. Поскольку принятый подход КЗ эффективно восстанавливает тепловой отклик, сжатые данные занимают гораздо меньше места в памяти, чем фактические тепловые данные. Реальные данные требуют 337 МБ памяти, в то время как сжатые данные 250 и 500 измерений требуют 73,3 и 145 МБ памяти соответственно. Среднее время восстановления общих тепловых данных для всех измерений на оборудовании с 8 ГБ ОЗУ составляет 19,83 мин. Первичные результаты по отдельным тепло-

вым профилям показывают, что уровень разреженности сильно влияет на точность восстановления и минимизацию шума по показателям СКОш и ОСШ, поэтому для данного случая был выбран оптимальный уровень разреженности, равный 35.

С другой стороны, количество измерений оказывает значительно меньшее влияние на эти параметры и восстановленные тепловые профили. Поэтому влияние количества измерений было дополнительно проанализировано путем восстановления сжатых данных для нескольких измерений и их обработки с помощью обычных методов обработки. Результаты показывают, что оптимальные результаты с улучшенными подписями дефектов с лучшими границами наблюдаются при количестве измерений от 300 до 400. Эти наблюдения позволяют сделать вывод, что КЗ применим в АТ, что может быть реализовано в случаях дистанционного контроля, когда ограничена пропускная способность каналов хранения и передачи данных. Будущие направления сосредоточены на анализе других КЗ-подходов и внедрении их в аппаратное обеспечение для сжатия данных, передачи и сверхразрешения тепловых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Candes E.* Compressive Sampling // Int. Congress of Mathematics. 2006. P. 1433—1452.
2. *Candes E., Wakin M.* An introduction to compressive sampling // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. V. 25 (2). P. 21—30.
3. *Davenport M., Duarte M., Eldar Y., Kutyniok G.* Introduction to compressed sensing. Chapter in *Compressed Sensing: Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2012.
4. *de Oliveira Mateus M., Khosravy Mahdi, Monteiro Henrique L.M., Cabral Thales W., Dias Felipe M., Lima Marcelo A.A., Manso Silva Leandro R., Duque Carlos A.* Compressive sensing of electroencephalogram: a review // *Compressive sensing in healthcare*. 2020. P. 247—268.
5. *Gunasheela S.K., Prasantha H.S.* Compressed sensing for image compression: survey of algorithms. *Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications*. Springer, Singapore, 2019. P. 507—517.
6. *Shi Jianing V., Sankaranarayanan Aswin C., Studer Christoph, Baraniuk Richard G.* Video compressive sensing for dynamic MRI // *BMC neuroscience*. 2012. V. 13. No. 1. P. 1—1.
7. *Maldague X.P.V.* *Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing*. New York: Wiley, 2001.
8. *Ciampa Francesco, Mahmoodi Pooya, Pinto Fulvio, Meo Michele.* Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 2. P. 609.
9. *Bison P.G., Bressan C., Di Sarno R., Grinzato E., Marinetti S., Manduchi G.* Thermal NDE of delaminations in plastic materials by neural network processing // *QIRT*. 1995. V. 94. P. 214—219.
10. *Ibarra-Castanedo Clemente, Benítez Hernan, Maldague Xavier, Bendada Abdelhakim.* Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography // *Proc. Int. Workshop on Imaging NDE*. 2007. Kalpakkam, India, 25—28 April 2007. P. 1—6.
11. *Bagavac Petra, Krstulović-Opara Lovre, Domazet Željko.* Infrared thermography of steel structure by FFT // *Materials Today: Proceedings*. 2019. No. 12. P. 298—303.
12. *Garrido Iván, Lagüela Susana, Sfarra Stefano, Arias Pedro.* Development of thermal principles for the automation of the thermographic monitoring of cultural heritage // *Sensors*. 2020. V. 20. No. 12. P. 3392.
13. *Panella F.W., Pirinu A.* Application of pulsed thermography and post-processing techniques for CFRP industrial components // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. No. 2. P. 1—17.
14. *Fleuret Julien R., Ebrahimi Samira, Ibarra-Castanedo Clemente, Maldague Xavier P.V.* Independent component analysis applied on pulsed thermographic data for carbon fiber reinforced plastic inspection: a comparative study // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. No. 10. P. 4377.
15. *Lopez Fernando, Ibarra-Castanedo Clemente, de Paulo Nicolau Vicente, Maldague Xavier.* Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression // *Ndt & E International*. 2014. V. 66. P. 128—138.
16. *Subhani S.K., Suresh B., Ghali V.S.* Orthonormal projection approach for depth-resolvable subsurface analysis in non-stationary thermal wave imaging // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2016. V. 58. No. 1. P. 42—45.
17. *Tabatabaei Nima, Mandelis Andreas.* Thermal-wave radar: A novel subsurface imaging modality with extended depth-resolution dynamic range // *Review of Scientific Instruments*. 2009. V. 80. No. 3. P. 034902.
18. *Wang Fei, Wang Yonghui, Liu Junyan, Wang Yang.* The feature recognition of CFRP subsurface defects using low-energy chirp-pulsed radar thermography // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. V. 16. No. 8. P. 5160—5168.
19. *Rani Anju, Ravibabu Mulaveesala.* Depth resolved pulse compression favourable frequency modulated thermal wave imaging for quantitative characterization of glass fibre reinforced polymer // *Infrared Physics & Technology*. 2020. V. 110. P. 103441.

20. *Deane Shakeb, Avdelidis Nicolas P., Ibarra-Castanedo Clemente, Williamson Alex A., Withers Stephen, Zolotas Argyrios, Maldague Xavier P.V.* et al. Development of a thermal excitation source used in an active thermographic UAV platform // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2022. P. 1—32.
 21. *Roy Deboshree, Tuli Suneet.* Applicability of LED-based excitation source for defect depth resolved frequency modulated thermal wave imaging // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. V. 66. No. 10. P. 2658—2665.
 22. *Roy Deboshree, Babu Prabhu, Tuli Suneet.* Sparse reconstruction-based thermal imaging for defect detection // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. V. 68. No. 11. P. 4550—4558.
 23. *Ahmadi Samim, Burgholzer P., Mayr G., Jung P., Caire G., Ziegler Mathias.* Photothermal super resolution imaging: A comparison of different thermographic reconstruction techniques // *NDT & E International*. 2020. V. 111. P. 102228.
 24. *Chen S.S., Donoho D.L., Saunders M.A.* Atomic decomposition by basis pursuit // *SIAM J. Sci. Comput*. 1999. V. 43. No. 1. P. 129—159.
 25. *Subhani Sk., Tanguturi Rama Chaithanya, Ghali V.S.* Chirp Z Transform Based Barker Coded Thermal Wave Imaging for the Characterization of Fiber Reinforced Polymers // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 7. P. 627—634.
 26. *Vesala G.T., Ghali V.S., Subhani S., Naga Prasanthi Y.* Material characterisation by enhanced resolution in non-stationary thermal wave imaging // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2021. V. 63. No. 12. P. 721—726.
 27. *Candes E., Romberg J.* Practical signal recovery from random projections // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005.
 28. *Candes E., Romberg J., Tao T.* Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements // *Communications on Pure and Applied Mathematics*. 2006. V. 59. No. 8. P. 1207—1223.
 29. *Candes E.J., Romberg J.* Sparsity and incoherence in compressive sampling // *Inverse Problems*. 2007. V. 23. No. 3. P. 969—985.
 30. *Candes E., Tao T.* Near optimal signal recovery from random projections and universal encoding strategies / Technical Report math. CA/0410542. 2004.
 31. *Pati Y.C., Rezaifar R., Krishnaprasad P.S.* Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition / *Proc. Rec 27th Asilomar Conf Sign. Syst Comput*, 1993.
 32. *Murthy N.S.S.R., Muralikrishna I.V.* Comparative Analysis of FFT and DCT Performances in Image Compression and Evaluation of Their Performances // *Indian Journal Of Applied Research*. 2015. V. 5. No. 11.
-