

## Восстановление пропущенных данных на ультразвуковых дефектограммах рельсового пути на основе локально-глобального выравнивания\*

Д. Н. Чепрасов<sup>1</sup>, А. А. Маленичев<sup>1</sup>, В. В. Сулимова<sup>1</sup>, О. В. Красоткина<sup>1</sup>,  
В. В. Моттль<sup>2</sup>, А. А. Марков<sup>3</sup>

tcheprasov.mitya@yandex.ru; malenichev@mail.ru; vsulimova@yandex.ru,  
o.v.krasotkina@yandex.ru; vmottl@yandex.ru; amarkovspb@gmail.com

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>3</sup>ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена актуальной проблеме автоматического восстановления пропущенных данных при ультразвуковом контроле рельсового пути, например из-за плохих погодных условий. Предлагаемый подход основывается на извлечении пропущенных данных из дефектограммы, соответствующей предыдущему проходу по тому же участку рельсового пути. В данной работе авторы усовершенствуют предложенный ими ранее метод, делая его более точным и существенно более быстрым. Разработанная трехоконная модель болтового соединения совместно с процедурой локально-глобального выравнивания и специальной мерой несходства элементов дефектограмм позволяют достаточно быстро обнаружить местоположение искомой области на предыдущей дефектограмме с точностью около 3,5 см, что обеспечивает возможность успешного восстановления по ней пропущенных данных.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль рельсов; ультразвуковая дефектограмма; пропущенные данные; сегментация сигнала; локально-глобальное выравнивание

DOI: 10.21469/22233792.1.12.08

## Recovering missing data on ultrasonic rail defectograms via semiglobal warping\*

D. N. Cheprasov<sup>1</sup>, A. A. Malenichev<sup>1</sup>, V. V. Sulimova<sup>1</sup>, O. V. Krasotkina<sup>1</sup>,  
V. V. Mottl<sup>2</sup>, and A. A. Markov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tula State University, 92 Lenina pr., Tula, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Russia

<sup>3</sup>Radioavionica Corp., 4B Troitskiy pr., Saint Petersburg, Russia

**Background:** The paper deals with the actual problem of automatic recovering missing data on ultrasonic rail defectograms, occurring due to, for example, bad weather conditions.

**Methods:** The proposed approach is based on retrieving missing data for current ultrasonic inspection from ultrasonic defectogram of previous inspection. In this work, the authors update their previous method, making it more accurate and appreciably more fast one. A special 3-windows model for fast localization of bolt-on joint areas and semiglobal warping procedure have been proposed based on special dissimilarity measure of defectogram elements for more precise definition of bolt-on joint area positions.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№ 15-37-50751, 15-07-08967 и 14-07-00661.

**Results:** The experiments show that the proposed approach allows for finding place of the area of interest with accuracy about 3.5 cm. So, it possesses good possibility to recover missing data from the previous defectogram.

**Keywords:** *nondestructive rail inspection; ultrasonic defectogram; missing data; signal segmentation; semiglobal warping*

**DOI:** 10.21469/22233792.1.12.08

## 1 Введение

В процессе эксплуатации железнодорожного пути в рельсах под воздействием подвижного состава, природных и других факторов образуются дефекты и повреждения, угрожающие безопасности движения поездов. В связи с этим, во избежание чрезвычайных ситуаций, необходимо своевременное выявление и замена рельсов, содержащих дефекты [1, 2].

Большинство дефектов располагаются внутри рельса и оказываются не видны при обычном осмотре, в связи с чем для их выявления в настоящее время в российской железнодорожной отрасли активно используются управляемые операторами средства ультразвукового контроля — съемные двухниточные дефектоскопы (рис. 1), осуществляющие регистрацию сигналов ультразвукового контроля на дефектограмме [3–5].

Однако, хотя существует специальное программное обеспечение для сбора, просмотра и интерпретации ультразвуковых дефектограмм [6, 7], ежегодно все-таки случается около 40–60 изломов рельсов [8], причем каждый из таких изломов может иметь чрезвычайно серьезные последствия.

Одной из основных причин обнаружения дефектов являются так называемые непроконтролируемые области — участки рельсового пути, на которых ультразвуковой сигнал не был зарегистрирован [9]. Такие области могут появляться, например, из-за специфического повреждения поверхности рельсов или неровного их соединения [9, 10], высокой скорости движения дефектоскопа и(или) временного плохого акустического контакта приемника ультразвукового сигнала с поверхностью исследуемого участка рельсового пути.

При этом наиболее частой причиной появления непроконтролируемых участков являются неблагоприятные погодные условия [9, 10], о чем, в частности, говорит существенное увеличение количества таких участков в холодные месяцы года [4]. Более того, статистика показывает, что лишь около 15% непроконтролируемых участков также являются непроконтролируемыми и на предыдущих проходах дефектоскопом по тому же участку



**Рис. 1** Современный съемный двухниточный дефектоскоп АВИКОН-14

рельсового пути [4], что, с учетом достаточно частого контроля, осуществляемого 2–4 раза в месяц [11], дает возможность восстановления пропущенных данных на основе анализа дефектограммы, зарегистрированной во время предыдущего прохода по тому же участку.

Однако в большинстве работ проблема наличия непроконтролированных участков даже не поднимается [1, 3, 6, 7, 12, 13]. На практике же в настоящее время данная проблема обычно решается путем повторного исследования оператором непроконтролированного участка [2], что, естественно, приводит к дополнительным временным и материальным затратам. Иногда осуществляется ручной поиск соответствующего участка на дефектограмме предыдущего прохода [14], однако очевидно, что гораздо более предпочтительным было бы привлечение средств автоматизации [15].

Вообще говоря, избежать непроконтролированных областей позволяет применение магнитодинамических (МД) методов [16]. Однако МД-устройства имеют свои специфические особенности по сравнению с ультразвуковыми: возможность обнаружения дефектов только в верхней части головки рельсов; значительные габариты и массу намагничивающей системы и, в связи с этим, возможность реализации метода в основном на автомоторисах и вагонах-дефектоскопах. В [17] предложена технология совместного использования данных магнитодинамических и ультразвуковых методов для формирования диагностической карты рельсового пути. Целью же данной работы является решение проблемы наличия непроконтролированных областей, оставаясь в рамках исключительно ультразвукового контроля, без привлечения дополнительных технических средств.

Хотя известно множество методов восстановления пропущенных данных во временных рядах [18–20], однако следует отметить, что обычно в таких задачах требуется восстановить пропущенные данные на основе анализа остальной части того же сигнала, в результате чего соответствующие методы основаны на интерполяции пропущенных данных тем или иным способом.

Особенность же задачи восстановления пропущенных данных на ультразвуковой дефектограмме заключается в возможности привлечения дополнительной информации с другой дефектограммы, что делает нецелесообразным применение традиционных методов.

Фактически в данном случае задача восстановления пропущенных данных сводится к задаче поиска соответствующей области на дефектограмме с другого прохода. При этом следует обратить внимание, что, несмотря на то что при регистрации ультразвукового сигнала фиксируются координаты дефектоскопа, данная задача не является тривиальной, поскольку регистрируемые координаты являются весьма приблизительными и при разных проходах для одного и того же объекта могут отличаться на несколько метров (что соответствует более чем тысяче отсчетов дефектограммы). Более того, важная особенность данной задачи, отличающая ее от задач поиска некоторой области в сигнале, заключается в том, что сама искомая область не известна.

Следует отметить, что, несмотря на глобальную тенденцию к переходу на бесстыковые рельсовые пути, в настоящее время все еще остается достаточно большое количество болтовых соединений. Более того, проведенный анализ показывает, что именно в зонах болтовых соединений наиболее часто возникают весьма опасные изломы, появление которых связывается с наличием непроконтролированных областей [9].

В связи с этим в рамках данной работы, вслед за [21], предлагается решать задачу восстановления пропущенных данных на дефектограмме на основе выделения характерных элементов, которыми могут служить зоны болтовых соединений рельсового пути, т. е. производить частичную разметку дефектограммы.

Вообще говоря, известно множество различных методов разметки (сегментации) речевых [22], биомедицинских [23] и других сигналов [24–26], однако многие из них имеют очень высокую вычислительную сложность [23, 27]. В работах [14, 21] предложен способ осуществления разметки сигналов, ориентированный именно на задачу выделения зон болтовых соединений на ультразвуковых дефектограммах, за счет чего он является существенно более простым по сравнению с методами разметки общего вида. Тем не менее на практике оказывается, что и он имеет низкую вычислительную эффективность, поскольку требует прохождения скользящим окном по дефектограмме и осуществления парного выравнивания каждого фрагмента, вырезанного окном, с некоторым эталонным фрагментом, соответствующим типовому болтовому соединению. Данное обстоятельство делает невозможным практическое применение данного подхода в реальных условиях.

В связи с этим в данной работе предлагается новый подход, развивающий предложенный авторами ранее [21]. Предлагаемый подход тоже основан на прохождении скользящим окном по дефектограмме для поиска опорных зон болтовых соединений, однако требует лишь однократного выравнивания фрагментов дефектограмм для каждого болтового соединения за счет двух основных нововведений: во-первых, применения специальной трехконной модели для быстрой примерной локализации зоны болтового соединения и, во-вторых, применения специальной процедуры парного выравнивания фрагментов дефектограмм для уточнения ее положения.

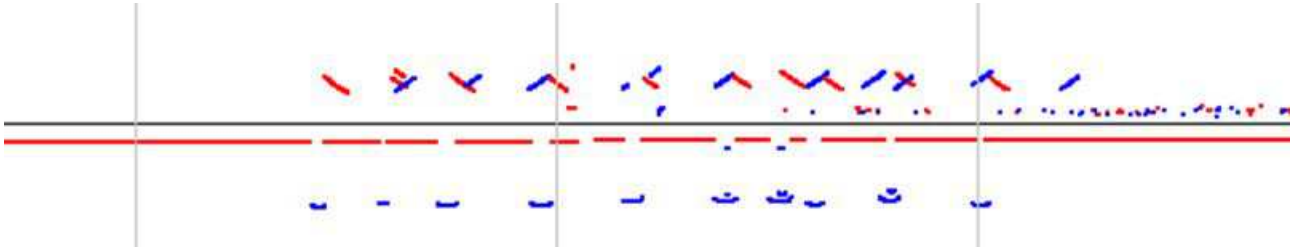
## 2 Регистрация ультразвуковой дефектограммы в виде многокомпонентного дискретного сигнала

Наиболее перспективным способом представления сигналов, регистрируемых многоканальным дефектоскопом, является так называемая *B*-развертка — представление сигнала в координатной плоскости «время распространения ультразвуковых колебаний в рельсе — координата контролируемой нити пути» [4]. Однако, как было отмечено выше, координаты являются условными и лишь приблизительно отражают местоположение объектов.

При ультразвуковой дефектоскопии рельсового пути, как правило, используются несколько каналов — ультразвуковых излучателей/приемников, посылающих зондирующие импульсы заданной амплитуды под некоторым углом к поверхности катания рельса (различные каналы отличаются друг от друга углом излучения/приема сигнала). Регистрация сигнала приемником происходит лишь в том случае, если в течение некоторого времени от момента излучения на приемник поступает отраженный сигнал, обладающий достаточно большой амплитудой.

Чаще всего при хорошем акустическом контакте ультразвукового излучателя и приемника, а также наличии отражающей поверхности, расположенной под углом  $90^\circ$  к направлению распространения ультразвука, происходит однократное отражение сигнала, и дефектоскоп регистрирует однократно отраженные от плоскости трещины импульсы. Однако, когда дефект или какой-либо конструктивный отражатель находится близко к поверхности рельса, ультразвуковой сигнал не успевает затухнуть, и могут наблюдаться случаи множественных переотражений, в результате которых будет зарегистрировано несколько групп (пачек) импульсов, принятых с разной задержкой относительно момента излучения. В случае отсутствия отражения ввиду плохого акустического контакта или отражения от дефекта, направленного к излучателю под углом, значительно отличающимся от  $90^\circ$ , импульс не будет зарегистрирован вовсе [15].

При наличии дефектов или каких-либо конструктивных отражателей (например, болтов при болтовом соединении рельсов) на дефектограмме появляются линии разной фор-



**Рис. 2** Пример фрагмента ультразвуковой дефектограммы рельсового пути, содержащего зону болтового соединения

мы, ориентации и продолжительности в зависимости от вида объекта, оказавшегося на пути распространения ультразвукового сигнала (рис. 2).

Согласно данному способу представления каждый элемент дефектограммы по отдельному каналу представляет собой импульсный сигнал в пространстве «задержка»–«амплитуда» и может содержать некоторое количество  $n = 0, 1, 2, \dots$  импульсов, характеризующихся своей задержкой  $\tau_i$  и амплитудой  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Для удобства дальнейших рассуждений элемент дефектограммы, не содержащий импульсов, будем рассматривать как сигнал, состоящий из одного элемента  $n = 1$  с нулевой задержкой  $\tau_1 = 0$  и нулевой амплитудой  $a_1 = 0$ . С учетом этого каждый элемент дефектограммы оказывается представлен двухкомпонентным сигналом длины  $n$ , составленным из пар  $x = \{(\tau_i, a_i), i = 1, \dots, n\}$ .

Для объединения информации, получаемой по разным ультразвуковым каналам в данной работе, так же как и в [21], каждый элемент дефектограммы рассматривается как  $m$ -мерный вектор

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_m]^T, \quad x_k = \{(\tau_i, a_i) \in R^2, i = 1, \dots, n\}, \quad k = 1, \dots, m, \quad (1)$$

а дефектограмма, соответственно, как  $m$ -компонентный дискретный сигнал  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_X})$  некоторой длины  $N_X$ .

### 3 Задача восстановления пропущенных данных на дефектограмме

#### 3.1 Постановка задачи

Как было сказано выше, под пропущенными данными в рассматриваемом случае понимается отсутствие на зарегистрированной дефектограмме сигнала на некотором участке пути, причиной чего могут быть, например, неблагоприятные погодные условия.

В рамках данной работы задача восстановления пропущенных данных на дефектограмме формулируется как задача поиска пропущенной области на дефектограмме, соответствующей предыдущему проходу по тому же участку рельсового пути.

#### 3.2 Основной принцип восстановления пропущенных данных

Поскольку на искомом участке дефектограммы вид сигнала неизвестен, то для его поиска в данной работе используется принцип, предложенный в [21], основывающийся на поиске на дефектограммах опорных областей, в качестве которых используются зоны болтовых соединений.



**Рис. 3** Графическая иллюстрация принципа восстановления пропущенных данных

Согласно данному принципу, проиллюстрированному на рис. 3, поиск искомой области на дефектограмме предыдущего прохода осуществляется в несколько этапов:

1. Поиск фрагмента дефектограммы, соответствующего ближайшей зоне болтового соединения, слева от искомого фрагмента.
2. Поиск фрагмента дефектограммы, соответствующего ближайшей зоне болтового соединения, справа от искомого фрагмента.
3. Поиск конкретных, найденных на первых двух этапах «левой» и «правой» зон болтового соединения на дефектограмме, соответствующей предыдущему проходу.
4. Уточнение координат искомого фрагмента на дефектограмме предыдущего прохода.

Следует отметить, что, хотя в основу используемого в данной работе подхода положен принцип, предложенный в работе [21], реализация каждого конкретного этапа в нем существенно отличается от реализаций, применяемых в [21], а общая эффективность оказывается существенно более высокой.

### 3.3 Поиск опорных зон на дефектограмме текущего прохода

Поиск «левой» и «правой» зон болтового соединения предлагается осуществлять в два этапа:

1. Быстрая примерная локализация зоны болтового соединения на основе описанной ниже специально разработанной трехконной модели.
2. Уточнение координат искомой зоны болтового соединения на основе установления оптимальных парных соответствий между элементами фрагмента дефектограммы, найденного на первом этапе, с фрагментом дефектограммы, соответствующим типовой зоне болтового соединения. При этом в качестве критерия поиска оптимальных парных соответствий предлагается использовать специальный критерий локально-глобального выравнивания.

Результатом данного этапа являются фрагменты дефектограмм, соответствующие «левой» и «правой» опорным зонам болтового соединения на дефектограмме текущего прохода, координаты соответствующих рельсовых стыков, а также фрагмент дефектограммы текущего прохода, ограниченный найденными зонами болтовых соединений.

### 3.4 Поиск опорных зон на дефектограмме предыдущего прохода

Поиск опорных зон на предыдущем проходе предлагается осуществлять аналогично поиску опорных зон на текущем проходе, однако учитывая, что в данном случае требуется найти конкретные зоны болтовых соединений.

В связи с этим на втором этапе осуществляется локально-глобальное выравнивание не с фрагментом дефектограммы, соответствующим типовой зоне болтового соединения, а с конкретными фрагментами, соответствующими опорным «левой» и «правой» зонам болтовых соединений. При этом зона болтового соединения считается найденной, если вычисленное значение критерия оптимальности парного выравнивания фрагментов окажется выше заданного порога.

Кроме того, следует обратить внимание, что процедуру локализации зоны болтового соединения в данном случае достаточно применять не для всей дефектограммы предыдущего прохода, а лишь для некоторой окрестности координат «левого» и «правого» рельсовых стыков, определенных на предыдущем этапе.

### 3.5 Уточнение координат искомого фрагмента на дефектограмме предыдущего прохода

Уточнение положения искомого фрагмента предлагается осуществлять на основе предположения о том, что на протяжении участка дефектограммы между найденными «левой» и «правой» зонами болтовых соединений скорость движения дефектоскопа сильно не изменялась. В этом случае положение искомой области, содержащей пропуск, может быть определено на основе применения подтвердившегося на практике принципа пропорциональности.

В соответствии с данным принципом координата начала  $t_{start}$  и конца  $t_{end}$  искомой области относительно начала вырезанного фрагмента текущей дефектограммы, ограниченного опорными болтовыми соединениями (рис. 4), определяется следующим образом:

$$t_{start} = l_{cur} = l_{prev} \frac{L_{cur}}{L_{prev}} ; \quad t_{end} = l_{cur} + \Delta l .$$

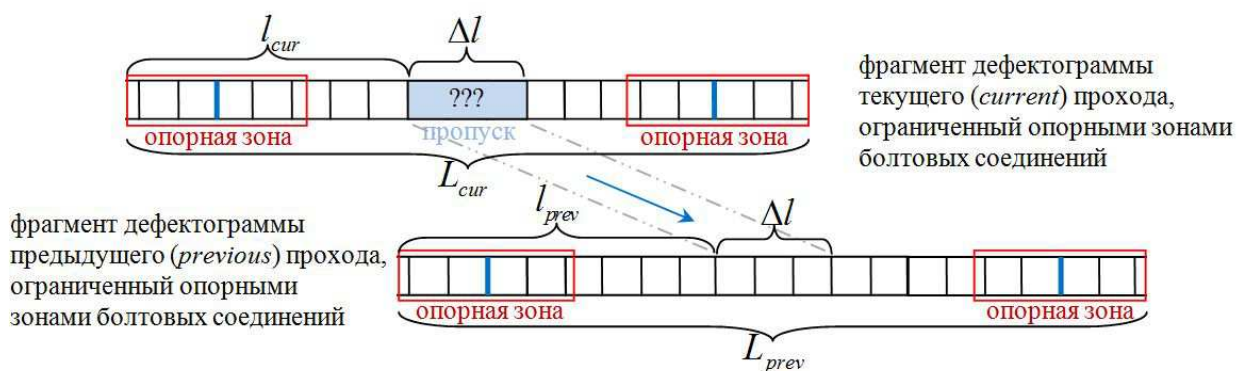
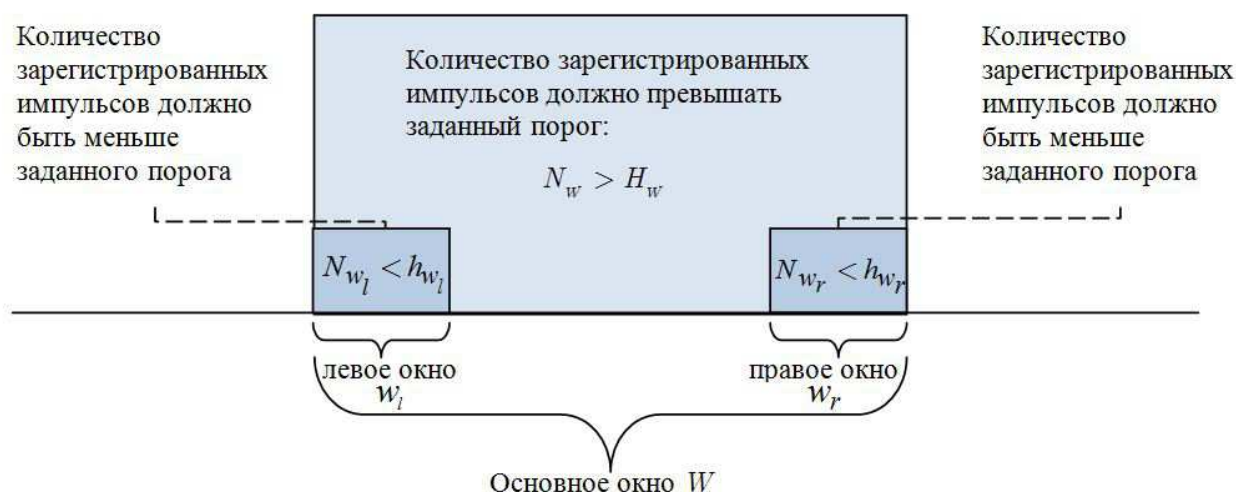


Рис. 4 Иллюстрация принципа пропорциональности

## 4 Трехконная модель для быстрой примерной локализации зоны болтового соединения

Для примерной локализации зоны болтового соединения в данной работе предлагается подход, основанный на прохождении скользящим окном некоторой ширины  $W$  вдоль дефектограммы с шагом  $\Delta W$ , с применением специально разработанной трехконной модели для быстрого определения среди фрагментов дефектограммы, вырезанных скользящим окном, фрагмента, содержащего зону болтового соединения.



**Рис. 5** Трехоконная модель для быстрой примерной локализации зоны болтового соединения

Основная идея использования трехоконной модели заключается в том, чтобы в дополнение к основному окну  $W$  использовать два дополнительных окна небольшого размера, расположенных по краям основного окна: левое  $w_l$  и правое  $w_r$  (рис. 5), а также в принятии решения о наличии зоны болтового соединения в окне  $W$  на основе информации о количестве зарегистрированных импульсов.

Предлагается считать, что окно  $W$  содержит зону болтового соединения только в том случае, если одновременно выполняются три условия:

- (1) количество импульсов, зарегистрированных в основном окне, больше заданного для него порогового значения:  $N_W > H_W$ ;
- (2) количество импульсов, зарегистрированных в левом окне, меньше заданного для него порогового значения:  $N_{w_l} < h_{w_l}$ ;
- (3) количество импульсов, зарегистрированных в правом окне, меньше заданного для него порогового значения:  $N_{w_r} < h_{w_r}$ .

В случае если сразу несколько подряд идущих окон подходят под заданную модель болтового соединения, из них может быть оставлено одно — центральное окно.

## 5 Поиск оптимальных парных соответствий между элементами дефектограмм

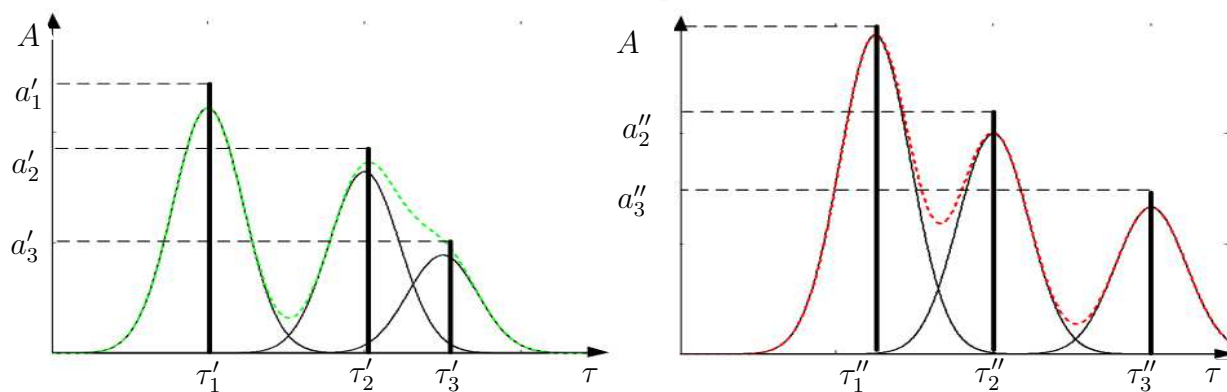
### 5.1 Сравнение элементов дефектограмм

Очевидно, что поиск оптимальных парных соответствий между элементами дефектограмм должен основываться на сравнении составляющих их элементов. Причем от того, насколько удачно будет выбрана мера несходства элементов дефектограмм, во многом зависит и качество результата поиска оптимальных соответствий.

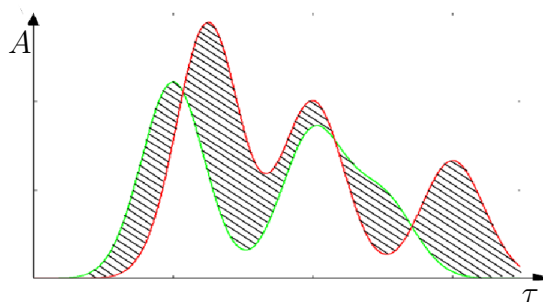
Поскольку каждый элемент дефектограммы по отдельному каналу представляет собой импульсный сигнал и может содержать некоторое количество импульсов (1), то прямое их сравнение оказывается невозможным.

В связи с этим в данной работе используется специальная математическая модель, предложенная авторами в [14], для представления элементов дефектограмм в виде, удобном для их дальнейшего сравнения.





**Рис. 6** Графическое представление модели описания элемента дефектограммы по одному каналу



**Рис. 7** Графическое представление меры несходства двух элементов дефектограмм

Согласно данной модели, каждый элемент дефектограммы по отдельному каналу  $x = \{(\tau_i, a_i), i = 1, \dots, n\}$  описывается взвешенной суммой нормальных распределений с некоторой дисперсией  $\sigma$  и математическим ожиданием, равным задержке соответствующего импульса  $\tau_i$ :

$$f(\tau|x) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\tau - \tau_i)^2\right). \tag{2}$$

При этом для точки, в которой не зарегистрировано импульсов,  $f(x) = 0$ , что не противоречит здравому смыслу.

Пусть  $x' = \{(\tau'_i, a'_i) \in R^2, i = 1, \dots, n'\}$  и  $x'' = \{(\tau''_i, a''_i) \in R^2, i = 1, \dots, n''\}$  — два элемента дефектограммы. Пример их графического представления согласно выбранной модели представлен на рис. 6.

Меру их несходства вслед за [21] будем вычислять как интеграл от квадрата разности представляющих их функций (2):

$$\tilde{r}(x', x'') = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [f(\tau|x') - f(\tau|x'')]^2 d\tau}. \tag{3}$$

Геометрически данная мера несходства может быть интерпретирована как площадь фигуры, ограниченной графиками распределений, описывающих сравниваемые элементы дефектограммы (рис. 7).

Удобство используемого представления заключается в том, что интеграл в (3) может быть вычислен аналитически. В результате мера несходства (3) может быть записана в следующем эквивалентном виде:

$$\begin{aligned} \tilde{r}(x', x'') &= \sqrt{\rho(x', x') + \rho(x'', x'') - 2\rho(x', x'')} ; \\ \rho(x', x'') &= \sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^{n''} a'_i a''_j \exp \left[ - \left( \frac{\tau'_i - \tau''_j}{2\sigma} \right)^2 \right] . \end{aligned} \quad (4)$$

При этом несходство некоторого элемента дефектограммы  $x' = \{(\tau'_i, a'_i) \in R^2, i = 1, \dots, n'\}$  с нулевым элементом  $\varphi = (0, 0)$ , не содержащим импульсов, может быть вычислено по еще более простой формуле:

$$\tilde{r}(x', \varphi) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n'} \sum_{k=1}^{n'} a'_i a'_k \exp \left[ - \left( \frac{\tau'_i - \tau'_k}{2\sigma} \right)^2 \right]} .$$

Очевидно, что одинаковые по форме сигналы будут иметь нулевую меру несходства. Наибольшее же значение меры несходства будет наблюдаться при сравнении сигнала с большим количеством высокоамплитудных импульсов и нулевого сигнала.

Совместное использование информации, полученной с разных каналов, в рамках данной работы осуществляется путем вычисления расширенной меры несходства элементов дефектограммы, представляющей собой линейную комбинацию частных мер несходства (4) с некоторыми неотрицательными весами  $c_i$ , в сумме составляющими единицу:

$$r(x', x'') = \sum_{i=1}^m c_i \tilde{r}(x'_i, x''_i), \quad \sum_{i=1}^m c_i = 1 . \quad (5)$$

## 5.2 Постановка задачи поиска оптимальных парных соответствий

Пусть имеются два многокомпонентных дискретных сигнала,  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_X})$  и  $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_{N_Y})$ , представляющих согласно (1) фрагменты дефектограмм и имеющих в общем случае разную длину. Один из них —  $\mathbf{X}$  — примем за «базовый», а другой —  $\mathbf{Y}$  — за «ссылочный».

Пусть также на множестве элементов этих сигналов определена метрика, например согласно (5).

Требуется найти оптимальные парные соответствия элементов дефектограмм (оптимальное парное выравнивание соответствующих сигналов)

$$\hat{T} = \arg \min_T J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T) ,$$

т. е. каждому элементу из базового сигнала сопоставить некоторый элемент из ссылочного, а результат запомнить в виде таблицы ссылок

$$T = (\theta_t, t = 1, \dots, N_X) ,$$

где  $\theta_t \in \{1, N_Y\}$  — абсолютная ссылка (номер элемента в ссылочном сигнале, соответствующий элементу  $t$  в базовом).

Применительно к дискретным сигналам такую задачу принято называть задачей парного выравнивания (Dynamic Time Warping в англоязычной терминологии) [28].

### 5.3 Критерий локально-глобального выравнивания для поиска оптимальных парных соответствий

Очевидно, что решение задачи поиска оптимальных парных соответствий (парного выравнивания) фрагментов дефектограмм будет существенным образом зависеть от того, какой критерий парного выравнивания  $J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T)$  будет выбран для установления оптимальных парных соответствий.

Традиционным критерием парного выравнивания дискретных сигналов является критерий глобального выравнивания [14, 21, 28–30]. Особенностью глобального выравнивания является то, что при выравнивании обязательно ставятся в соответствие друг другу первые и последние элементы сравниваемых сигналов и ни один элемент не остается не связанным.

Однако такой способ хорошо подходит лишь для сравнения близких по длине фрагментов, что в работах [14, 21] обусловило необходимость прохождения вдоль дефектограммы скользящим окном фиксированной длины, равной длине зоны типового болтового соединения с последующим их выравниванием, и, соответственно, повлекло за собой необходимость выполнения большого объема вычислений.

В данной работе для поиска оптимальных парных соответствий между элементами дефектограмм впервые применяется критерий локально-глобального выравнивания, который в отличие от традиционного для сигналов критерия глобального выравнивания требует обязательного сопоставления всех элементов только одного из сравниваемых сигналов, во втором же сигнале произвольное число начальных и конечных элементов разрешается оставить несвязанными без наложения на это какого-либо штрафа:

$$\left. \begin{aligned}
 J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T) &= r(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_{\theta_1}) + \sum_{t=2}^{N_X} \gamma(\theta_{t-1}, \theta_t); \\
 \gamma(\theta_{t-1}, \theta_t) &= \begin{cases} \beta + r(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_{\theta_t}), & \theta_t = \theta_{t-1}; \\ \beta |\theta_t - \theta_{t-1} - 1| + \sum_{j=\theta_{t-1}+1}^{\theta_t} r(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_j), & \theta_t > \theta_{t-1}; \\ \infty, & \theta_t < \theta_{t-1}, \end{cases}
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\beta$  — штраф на непараллельные ссылки, соответствующие локальным сжатиям или растяжениям осей сигналов, представляющих фрагменты дефектограмм, при их выравнивании, а запись  $r(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_{\theta_1})$  означает, что первый элемент базовой дефектограммы может

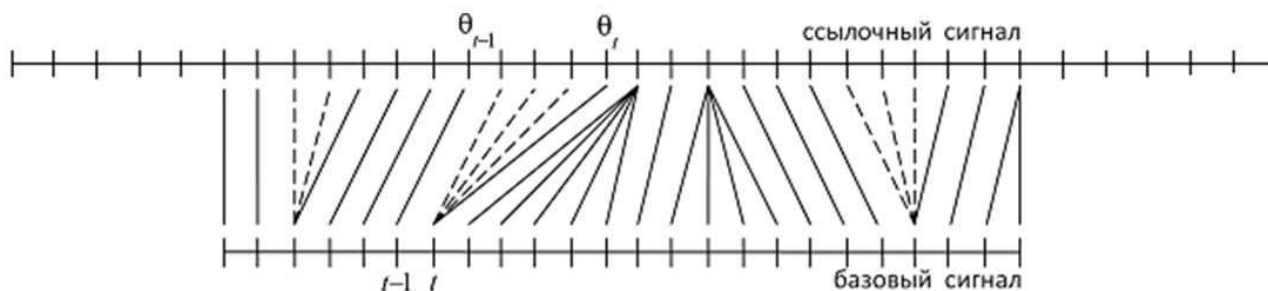


Рис. 8 Пример установления парных соответствий при локально-глобальном выравнивании

соответствовать любому элементу ссылочной дефектограммы. Схематично идея локально-глобального парного выравнивания фрагментов дефектограмм представлена на рис. 8.

Следует обратить внимание, что согласно критерию (6), в случае если  $|\theta_t - \theta_{t-1}| > 1$ , считается, что элемент  $t$  базового сигнала ставится в соответствие сразу нескольким элементам ссылочного сигнала  $\theta_{t-1} + 1, \dots, \theta_t$ .

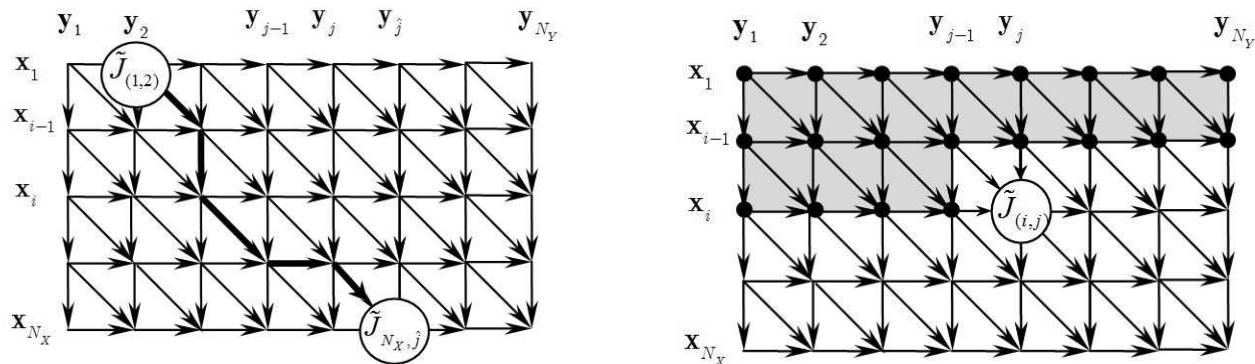
Самой важной особенностью критерия (6), эксплуатируемой в данной работе, является то, что он разрешает оставлять свободными начальные и конечные элементы ссылочного сигнала. Такая особенность делает его более адекватным по сравнению с критерием глобального выравнивания в случаях, когда требуется найти местоположение некоторого заданного небольшого фрагмента сигнала в более длинном, что как раз требуется в данной работе на стадии уточнения координат опорных зон болтового соединения.

### 5.4 Алгоритм локально-глобального выравнивания фрагментов дефектограмм

Следует обратить внимание, что критерий (6) является сепарабельной функцией, поскольку может быть представлен как сумма более простых функций, зависящих только от двух соседних переменных  $\theta_{t-1}$  и  $\theta_t$ . Поэтому его минимум может быть найден при помощи процедуры динамического программирования [31]. Однако более удобным, наглядным и эффективным является представление алгоритма при помощи графа парных соответствий, каждая вершина которого связывает определенный элемент базового сигнала с определенным элементом ссылочного сигнала, представляющих фрагменты дефектограмм.

Заметим, что любое локально-глобальное выравнивание фрагментов дефектограмм может быть представлено в виде пути на данном графе, начинающимся в одной из вершин верхней грани, проходящим последовательно по некоторым ребрам графа через его вершины и заканчивающимся в одной из вершин нижней грани (рис. 9). При этом перемещение по горизонтальному ребру соответствует локальному растяжению оси базового сигнала, перемещение по вертикальному ребру — локальному растяжению оси ссылочного сигнала.

Алгоритм поиска оптимальных парных соответствий при помощи графа парных соответствий заключается в последовательном прохождении по вершинам графа с координатами  $(i, j)$ ,  $i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y$ , начиная с левой верхней и заканчивая правой



(а) Пример локально-глобального выравнивания

(б) Иллюстрация алгоритма поиска оптимального парного выравнивания

Рис. 9 Примеры применения графа парных соответствий для выравнивания дефектограмм

нижней, и вычислении в каждой вершине значения неполного критерия  $\tilde{J}_{(i,j)}$ :

$$\begin{aligned} \tilde{J}_{(1,j)} &= r(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_j), \quad j = 1, \dots, N_Y; \\ \tilde{J}_{(i,j)} &= r(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) + \min \begin{cases} \beta + \tilde{J}_{(i-1,j)}, \\ \tilde{J}_{(i-1,j-1)}, \\ \beta + \tilde{J}_{(i,j-1)}, \end{cases} \quad i = 2, \dots, N_X, \quad j = 1, \dots, N_Y. \end{aligned}$$

В качестве последней вершины оптимального пути выбирается вершина нижней грани, обеспечивающая минимальное значение неполного критерия:

$$\hat{j} = \arg \min_{j=1, \dots, N_Y} \tilde{J}_{(N_X, j)}.$$

Оптимальное значение критерия равно значению в этой вершине:

$$J(T, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \tilde{J}_{(N_X, \hat{j})}.$$

Для восстановления траектории оптимального выравнивания, т.е. непосредственно таблицы соответствий  $T = (\theta_t, t = 1, \dots, N_X)$ ,  $\theta_t \in \{1, \dots, N_Y\}$  элементов сравниваемых фрагментов дефектограмм, на обратном ходе, последовательно перемещаясь в обратном направлении, начиная с вершины ( $t = N_X, \theta_{N_X} = \hat{j}$ ), определяется оптимальное направление обратного движения — индекс вершины, движение из которой в данную вершину обеспечивает минимум неполного критерия.

В целом данный алгоритм очень похож на алгоритм локально-глобального выравнивания символьных последовательностей [32], но имеет и некоторые принципиальные отличия, связанные с тем, что элементы символьных последовательностей в отличие от элементов дефектограмм принадлежат некоторому конечному алфавиту, а естественным способом деформации при выравнивании является удаление, вставка и замена символов, а не сжатие и растяжение, как в случае сигналов, представляющих дефектограммы.

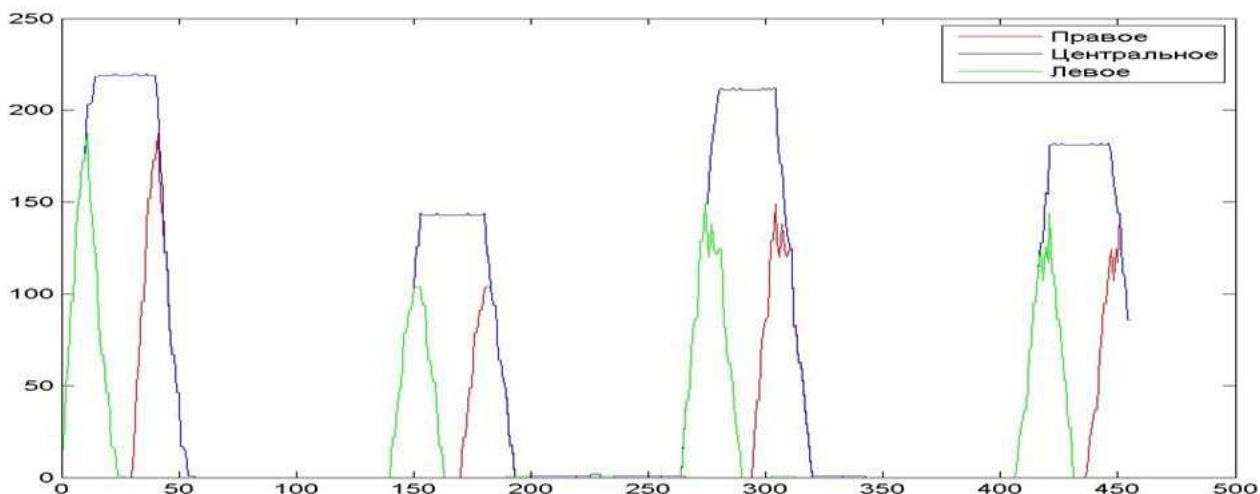
## 6 Экспериментальное исследование

### 6.1 Выбор параметров и исследование применимости трехконной модели для локализации зоны болтового соединения

Выбор параметров предложенной трехконной модели осуществлялся на основе анализа дефектограмм, включающих 20 зон болтовых соединений, а также участки между ними.

В результате было выявлено, что наиболее подходящим ультразвуковым каналом для применения трехконной модели является 6-й ультразвуковой канал наклонного (под углом  $42^\circ$ ) ввода ультразвуковых колебаний двухниточного дефектоскопа АВИКОН-11. Также были выбраны следующие параметры модели: ширина основного окна  $W = 2000$ ; ширина левого и правого дополнительных окон  $w_l = w_r = w = 500$ ; пороговое количество ультразвуковых импульсов в основном окне  $N_W = 160$ ; пороговое количество импульсов в левом и правом окнах  $N_{w_l} = N_{w_r} = N_w = 50$ ; шаг скольжения основного окна  $\Delta W = 50$ .

На рис. 10 представлен пример зависимостей количества зарегистрированных импульсов по 6-му каналу в левом (зеленый), основном (синий) и правом (красный) окнах от положения основного окна для выбранных значений параметров. Пример демонстрирует, что при выбранных значениях параметров трехконная модель позволяет уверенно выделить фрагменты дефектограмм, соответствующие зонам болтовых соединений.



**Рис. 10** График зависимости количества зарегистрированных импульсов от положения центрального окна для выбранных значений параметров

Проверка адекватности построенной модели осуществлялась на 60 фрагментах дефектограмм, не включающих фрагменты, использовавшиеся на этапе выбора параметров. Каждый из 60 анализируемых фрагментов дефектограмм содержит две зоны болтового соединения и три участка рельсового пути вне зоны болтового соединения. Таким образом, всего было проанализировано 120 зон болтовых соединений и 180 неболтовых соединений, что соответствует рельсовому пути общей протяженностью около 9 км.

Корректность работы разработанной процедуры локализации зон болтовых соединений оценивалась путем сравнения результатов ее работы с экспертной оценкой.

В результате все зоны болтовых соединений, размеченные экспертом, были локализованы верно — каждая зона болтового соединения была вырезана единственным окном, причем не было ни одного случая обрезания зоны болтового соединения (т. е. выбора фрагмента, дефектограммы, содержащего лишь ее часть), а также не было зафиксировано ни одного случая ложного срабатывания (т. е. выделения фрагмента, не содержащего зону болтового соединения).

## 6.2 Экспериментальное исследование точности выделения зон болтовых соединений

Целью данной части исследования являлась оценка точности выделения зон болтовых соединений на дефектограмме при помощи применения предложенной в данной работе трехконной модели совместно с процедурой локально-глобального выравнивания фрагментов дефектограмм.

На данном этапе экспериментального исследования использовался участок дефектограммы, содержащий 28 зон болтовых соединений, на котором экспертами были отмечены центры, соответствующие непосредственно рельсовым стыкам. Кроме того, дополнительно был выбран эталонный фрагмент дефектограммы, содержащий типовую зону болтового соединения, на котором также экспертом был отмечен рельсовый стык.

Согласно предложенному подходу сначала осуществлялась примерная локализация каждой из 28 зон болтовых соединений при помощи разработанной трехконной модели с параметрами, выбранными в предыдущем разделе.

**Таблица 1** Ошибка определения координат рельсового стыка (см)

Канал	min	max	mean	std	median
5	0,000	4,2000	1,6929	0,9622	1,7000
6	0,000	29,600	3,9857	7,0077	1,2000
7	0,000	83,000	10,414	21,474	1,3000
5 + 6 + 7	0,000	5,2000	1,2357	1,3065	0,600

**Таблица 2** Количество и процент зон болтовых соединений с заданной ошибкой определения координаты рельсового стыка

Канал	Ошибка сегментации (отклонение от отметки эксперта)			
	0 см	< 1 см	< 3 см	< 6 см
5	0 (0%)	8 (28,57%)	26 (92,85%)	28 (100%)
6	2 (7,14%)	14 (50%)	22 (78,57%)	28 (100%)
7	1 (3,57%)	13 (46,43%)	20 (71,43%)	22 (78,57%)
5 + 6 + 7	1 (3,57%)	16 (57,14%)	26 (92,85%)	28 (100%)

В результате применения процедуры локализации зон болтовых соединений было получено 28 фрагментов дефектограмм длиной 2000 отсчетов (4 м), каждый из которых содержит одну зону болтового соединения.

Далее производилось уточнение положения каждой зоны болтового соединения при помощи процедуры локально-глобального выравнивания каждого из найденных фрагментов с выбранным эталонным фрагментом, соответствующим типовому болтовому соединению.

Центр каждой найденной зоны болтового соединения (положение рельсового стыка) определялся как отсчет, поставленный в результате парного выравнивания в соответствие отмеченному экспертом рельсовому стыку на эталонном фрагменте.

Описанные вычисления производились 4 раза: по трем различным ультразвуковым каналам отдельно (5-, 6- и 7-му каналам) и по всем каналам одновременно. Для каждого из четырех указанных случаев были вычислены отклонения найденных координат рельсовых стыков для каждого из 28 зон болтовых соединений от координат стыков, отмеченных экспертом. Статистики данных отклонений приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены количества и доли зон болтовых соединений, найденные рельсовые стыки которых отклоняются от отмеченных экспертами на значение из указанного диапазона.

Как видно из табл. 1 и 2, использование информации, полученной по разным каналам, позволяет улучшить точность определения координат рельсового стыка. В результате, предложенный подход позволил достаточно точно произвести выделение зон болтовых соединений с ошибкой, не превышающей 6 см, причем в 92,85% случаев ошибка не превышает 3 см, что является достаточной точностью при анализе рельсового пути.

### 6.3 Экспериментальное исследование алгоритма восстановления пропущенных данных

Поскольку задача восстановления пропущенных данных сформулирована в данной работе как задача поиска на дефектограмме предыдущего прохода области, соответствующей пропуску данных на дефектограмме текущего прохода, то возможность успешного

**Таблица 3** Ошибки определения координат начала и конца искомой области на предыдущем проходе (см)

Проход	Положение пропуска относительно зоны болтового соединения					
	Вне зоны		В середине		В левой или правой части	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
1	2,6	1,6	2,2	3,4	3,2	4,4
2	1,8	2,8	2,6	3,8	3,4	3,8
3	3,8	4,2	3,0	4,2	2,8	4,2
4	2,2	2,8	3,4	1,8	3,6	4,4
5	1,2	0,4	3,4	3,0	1,8	0,8
6	3,0	3,8	3,8	4,2	3,2	4,4
7	3,8	4,2	3,6	1,6	3,8	4,2
8	6,4	5,2	4,6	2,2	3,2	4,4
9	3,8	4,6	5,0	3,8	3,8	4,2
10	1,8	4,2	3,4	9,0	5,6	6,2
Среднее	$3,04 \pm 1,5$	$3,38 \pm 1,48$	$3,49 \pm 0,83$	$3,7 \pm 2,1$	$3,44 \pm 0,95$	$4,1 \pm 1,33$
Среднее по всем экспериментам: $3,53 \pm 1,4$						

восстановления данных (при условии отсутствия пропуска на дефектограмме предыдущего прохода) определяется точностью определения координат интересующей области на дефектограмме предыдущего прохода. В связи с этим в данной части исследования был проведен эксперимент по определению на дефектограмме предыдущего прохода координат области, соответствующей пропуску, зная его координаты на дефектограмме с текущего прохода.

Для этого отдельно рассматривались три случая локализации пропуска данных:

- 1) пропуск данных находится вне зоны болтового соединения;
- 2) пропуск данных находится в начале или конце зоны болтового соединения;
- 3) пропуск данных находится в середине зоны болтового соединения.

Для каждого типа локализации пропуска данных было рассмотрено 10 различных фрагментов дефектограмм.

Для определения координат участка дефектограммы предыдущего прохода, соответствующего области пропущенных данным дефектограммы текущего прохода, применялся предложенный в данной работе подход, описанный в разд. 3.

В табл. 3 приведены полученные результаты.

Как видно из табл. 3, предложенный подход позволяет определить координаты начала и конца области, соответствующей пропущенным данным на дефектограмме предыдущего прохода с точностью около 3,5 см, при этом точность почти не зависит от того, попадает пропуск на зону болтового соединения или располагается вне ее. Однако точность определения положения пропуска вне зоны в среднем немного выше по сравнению с точностью определения положения пропуска, расположенного в зоне болтового соединения. Предположительной причиной этого является то, что в данном случае вырезаемый в соответствии с предложенным подходом фрагмент дефектограммы, ограниченный опорными зонами болтовых соединений, имеет двойную длину, поскольку зона болтового соединения, содержащая пропуск, не может являться опорной и находится внутри вырезаемого фрагмента. Используемый принцип пропорциональности при этом дает менее точные ре-



зультаты, поскольку на больших участках пути выше вероятность изменения скорости движения дефектоскопа.

Кроме того, следует отметить, что точность определения координаты конца интересующей нас зоны в среднем несколько ниже точности определения координаты начала соответствующей зоны. Предположительной причиной этого является то, что данная координата определяется исходя из предположения, что участок, соответствующий пропуску на дефектограмме предыдущего прохода, имеет ту же длину, что и пропуск на текущем проходе. Однако если скорость движения дефектоскопа была неодинаковой на первом и втором проходах, то и длина соответствующей области тоже может измениться, поэтому, возможно, применение принципа пропорциональности и для определения конца области может дать более точные результаты.

В целом следует отметить, что достигнутая точность является адекватной рассматриваемой прикладной задаче, что позволяет использовать предлагаемый подход для автоматического восстановления пропущенных данных на дефектограмме.

## 7 Заключение

В рамках данной работы предложен принцип восстановления пропущенных данных на ультразвуковой дефектограмме текущего прохода на основе анализа дефектограммы, полученной при предыдущем проходе дефектоскопом по тому же участку рельсового пути, а именно: на основе поиска опорных зон болтовых соединений на дефектограммах текущего и затем предыдущего проходов.

Данный подход является развитием предложенного ранее [14], делая его более точным и существенно более эффективным с вычислительной точки зрения.

Повышение эффективности стало возможным благодаря применению разработанной трехконной модели зоны болтового соединения и идентификации с ее помощью зоны болтового соединения не по результатам парного выравнивания, а на основе анализа количества зарегистрированных импульсов.

Предложенная трехконная модель позволяет осуществить быстрое, уверенное, но достаточно грубое определение местоположения зоны болтового соединения. Для уточнения координат зоны болтового соединения в рамках данной работы предложена локально-глобальная процедура парного выравнивания фрагментов дефектограмм, существенно отличающаяся от традиционной для сигналов процедуры глобального выравнивания тем, что ориентирована именно на поиск местоположения короткого фрагмента в длинном, а не просто на вычисление несходства сигналов. Хотя в данном случае тоже применяется процедура выравнивания фрагментов дефектограмм, следует отметить, что она применяется лишь однократно для каждой зоны болтового соединения, что обеспечивает существенно большую эффективность по сравнению с [21].

Еще большего повышения эффективности можно достичь за счет распространения принципа быстрой оптимизации критерия глобального выравнивания [33,34] на процедуру локального выравнивания, а также за счет привлечения средств параллельной обработки данных. В частности, существенного повышения производительности можно достичь, осуществив параллельное вычисление несходства элементов дефектограмм. Кроме того, отдельные этапы предложенного подхода также обеспечивают естественную возможность применения параллельных вычислений, например одновременно может выполняться поиск левой и правой опорных зон болтовых соединений.

Достигнутая точность определения координат искомой области на дефектограмме предыдущего прохода ( $3,5 \pm 1,4$ ) является адекватной рассматриваемой прикладной за-

даче, что позволяет использовать предлагаемый подход для автоматического восстановления пропущенных данных на ультразвуковой дефектограмме рельсового пути.

## Литература

- [1] *Jimenez-Redondo N., Bosso N., Zeni L., Minardo A., Shubert F., Heinicke F., Simrothhubert A.* Automated and cost effective maintenance for railway (ACEM-Rail) // *Procedia Social Behavioral Sci.*, 2012. Vol. 48. P. 1058–1067.
- [2] *Марков А. А., Шпагин Д. А.* Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. — 2-е изд. перераб. и доп. — СПб: Образование — Культура, 2013. 284 с.
- [3] *Jemec V., Grum J.* Automated non-destructive testing and measurement systems for rails // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. — Moscow, 2010. [www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_10\\_42.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_10_42.pdf).
- [4] *Марков А. А., Козьяков А. Б., Кузнецова Е. А., Шпагин Д. А.* Утраченные и новые технологии контроля рельсов // *Путь и путевое хозяйство*, 2013. № 8. С. 2–9.
- [5] *Марков А. А., Кузнецова Е. А.* Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 2. Расшифровка дефектограмм. — СПб: УльтраПринт, 2014. 332 с.
- [6] *Шилов М. Н.* Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение регистрации и анализа дефектограмм при ультразвуковом контроле рельсов. Дисс. ... канд. техн. наук. СПб, 2007.
- [7] *Heckel T., Thomas H., Kreuzbruck M., Ruhe S.* High speed non-destructive rail testing with advanced ultrasound and eddy-current testing techniques // *Indian National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation — NDE*, 2009.
- [8] *Марков А. А.* Современное состояние, проблемы и направления развития диагностики рельсов и элементов инфраструктуры // *Путь и путевое хозяйство*, 2015. № 4. С. 19–24.
- [9] *Марков А. А., Гараева В. С.* Об акустическом контакте в зоне болтовых стыков // *Путь и путевое хозяйство*, 2008. № 12. С. 15–17.
- [10] *Марков А. А., Козьяков А. Б., Кузнецова Е. А.* Расшифровка дефектограмм ультразвукового контроля рельсов. — СПб, 2006. 206 с.
- [11] *Бирюзов В. П.* Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // *Путь и путевое хозяйство*, 2015. № 4. С. 4–9.
- [12] *Jarmulak J., Kerchoffs E.* Case-based reasoning for interpretation of data from non-destructive testing // *Eng. Appl. Artificial Intell.*, 2001. Vol. 14. No. 4. P. 401–417.
- [13] *Papaelias M., Roberts C., Davis C.* A review on nondestructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development // *Proc. IMechE, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 2008. Vol. 222. P. 367–384.
- [14] *Маленичев А. А., Красоткина О. В., Сулимова В. В., Моттль В. В., Марков А. А.* Применение процедуры парного выравнивания для разметки стыков на ультразвуковой дефектограмме рельсового пути // *Известия ТулГУ. Сер. Технические науки*, 2013. Вып. 9. Ч. 1. С. 115–128.
- [15] *Федоренко Д. В.* Проблемы автоматизации расшифровки сигналов многоканального ультразвукового контроля рельсов // *Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сб. научн. тр. Юбилейный выпуск. 1991–2011.* — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 117–120.
- [16] *Марков А. А., Антипов А. Г.* Магнитодинамический метод контроля рельсов // *В мире НК*, 2012. № 3(57). С. 66–71.

- [17] Марков А. А., Кузнецова Е. А., Антипов А. Г., Вережкин А. Ю. Способ диагностики рельсового пути. Патент на изобретение № 2521095. Оpubл. 27.06.2014.
- [18] Candes J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information // *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2006. No. 52. P. 489–509.
- [19] Candes J., Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies? // *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2006. Vol. 52. No. 12. P. 5406–5425.
- [20] Cai J.-F., Shen Z., Ye G.-B. Approximation of frame based missing data recovery // *Appl. Comput. Harmonic Anal.*, 2011. Vol. 31. № 2. P. 185–204.
- [21] Malenichev A., Sulimova V., Krasotkina O., Markov A., Mottl V. Automatic analysis of ultrasonic railway defectograms with uncontrolled regions // *Machine learning and data mining in pattern recognition. — Lecture notes in computer science ser. — Springer*, 2014. Vol. 8556. P. 315–327.
- [22] Wang D., Lu L., Zhang H. J. Speech segmentation without speech recognition // *Conference (International) on Multimedia and Expo (ICME '03)*, 2003. Vol. 1. P. 405–408.
- [23] Kehagias A., Nidelkou E., Petridis V. A dynamic programming segmentation procedure for hydrological and environmental time series // *Stochastic Environmental Res. Risk Assessment*, 2006. P. 77–94.
- [24] Lavielle M. Optimal segmentation of random processes // *IEEE Trans. Signal Proc.*, 1998. Vol. 46. No. 5. C. 365–373.
- [25] Fearnhead P. Exact Bayesian curve fitting and signal segmentation // *IEEE Trans. Signal Proc.*, 2005. Vol. 53. No. 6. P. 2160–2166. doi: 10.1109/TSP.2005.847844.
- [26] Sasan M., Bayan S. A nonlinear variational method for signal segmentation and reconstruction using level set algorithm // *Signal Proc.*, 2006. Vol. 86. Iss. 11. P. 3496–3504.
- [27] Mico P., Mora M., Cuesta-Frau D., Aboy M. Automatic segmentation of long-term ECG signals corrupted with broadband noise based on sample entropy // *Computer Methods Programs Biomedicine*, 2010. Vol. 98. Iss. 2. P. 118–129.
- [28] Martens R., Claesen L. On-line signature verification by dynamic time-warping // *13th IEEE Conference (International) on Pattern Recognition Proceedings*, 1996. Vol. 1. P. 38–42.
- [29] Вербовой В. В. Метрики для сравнения звуковых сигналов с учетом особенностей человеческого уха // *Компьютерная графика и мультимедиа*, 2005. № 3. С. 2–10.
- [30] Wang, X., Mueen A., Ding H., Trajcevski G., Scheuermann P., Keogh E. Experimental comparison of representation methods and distance measures for time series data // *Data Mining Knowledge Discovery*, 2013. Vol. 26. No. 2. P. 275–309.
- [31] Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. — М.: Наука, 1969. 118 с.
- [32] Jones N. C., Pevzner P. A. An introduction to bioinformatics algorithms. The MIT Press, 2004. 435 p.
- [33] Salvador S., Chan P. FastDTW: Toward accurate dynamic time warping in linear time and space // *KDD Workshop on Mining Temporal and Sequential Data*, 2004. P. 70–80.
- [34] Al-Naymat G., Chawla S., Taheri J. SparseDTW: A novel approach to speed up dynamic time warping // *The 2009 Australasian Data Mining*, 2009. Vol. 101. P. 117–127.

Поступила в редакцию 14.06.2015

## References

- [1] Jimenez-Redondo, N., N. Bosso, L. Zeni, A. Minardo, F. Shubert, F. Heinicke, and A. Simrothhubert. 2012. Automated and cost effective maintenance for railway (ACEM-Rail). *Procedia Social Behavioral Sci.* 48:1058–1067.

- [2] Markov, A. A., and D. A. Shpagin. 2013. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya rel'sov*. 2nd ed. SPb: Obrazovanie — Kul'tura. 284 p. (In Russian.)
- [3] Jemec, V., and J. Grum. 2010. Automated non-destructive testing and measurement systems for rails. *10th European Conference on Non-Destructive Testing*. Moscow. Available at: [www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_10\\_42.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_10_42.pdf).
- [4] Markov, A. A., A. B. Koz'jakov, E. A. Kuznecova, and D. A. Shpagin. 2013. Utrachennye i novye tekhnologii kontrolya rel'sov. *Put' i putevoe hozyaystvo* 8:2–9. (In Russian.)
- [5] Markov, A. A., and E. A. Kuznecova. 2014. *Defektoskopiya rel'sov. Formirovanie i analiz signalov. Book 2. Rasshifrovka defektogramm*. SPb: Ul'traPrint. 332 p. (In Russian.)
- [6] Shilov, M. N. 2007. Metodicheskoe, algoritmicheskoe i programmnoe obespechenie registratsii i analiza defektogramm pri ul'trazvukovom kontrole rel'sov. PhD Diss. SPb. (In Russian.)
- [7] Heckel, T., H. Thomas, M. Kreutzbruck, and S. Ruhe. 2009. High speed non-destructive rail testing with advanced ultrasound and eddy-current testing techniques. *Indian National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation — NDE*.
- [8] Markov, A. A. 2015. Sovremennoe sostoyanie, problemy i napravleniya razvitiya diagnostiki rel'sov i elementov infrastruktury. *Put' i putevoe hozyaystvo* 4:19–24. (In Russian.)
- [9] Markov, A. A., and V. S. Garaeva. 2008. Ob akusticheskom kontakte v zone boltovykh stykov. *Put' i putevoe hozyaystvo* 12:15–17. (In Russian.)
- [10] Markov, A. A., A. B. Koz'jakov, and E. A. Kuznecova. 2006. *Rasshifrovka defektogramm ul'trazvukovogo kontrolya rel'sov*. SPb. 206 p. (In Russian.)
- [11] Birjuzov, V. P. 2015. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa putevogo hozyaystva do 2025 g. *Put' i putevoe hozyaystvo* 4:4–9. (In Russian.)
- [12] Jarmulak, J., and E. Kerchoffs. 2001. Case-based reasoning for interpretation of data from non-destructive testing. *Eng. Appl. Artificial Intell.* 14(4):401–417.
- [13] Papaalias, M., C. Roberts, and C. Davis. 2008. A review on nondestructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development. *Proc. IMechE, Part F, J. Rail Rapid Transit* 222:367–384.
- [14] Malenichev, A. A., O. V. Krasotkina, V. V. Sulimova, V. V. Mottl', and A. A. Markov. 2013. Primenenie procedury parnogo vyravnivaniya dlya razmetki stykov na ul'trazvukovoy defektogramme rel'sovogo puti. *Izvestiya TulGU, ser. Tehnicheskie nauki* 9(1):115–128. (In Russian.)
- [15] Fedorenko, D. V. 2011. Problemy avtomatizatsii rasshifrovki signalov mnogokanal'nogo ul'trazvukovogo kontrolya rel'sov. *Radioelektronnye kompleksy mnogotselevogo naznacheniya: Sb. nauchn. tr. Jubileyny vypusk. 1991—2011*. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 117–120. (In Russian.)
- [16] Markov, A. A., and A. G. Antipov. 2012. Magnitodinamicheskii metod kontrolya rel'sov. *V mire NK* 3(57):66–71. (In Russian.)
- [17] Markov, A. A., E. A. Kuznecova, A. G. Antipov, and A. Yu. Verevkin. 2014. Sposob diagnostiki rel'sovogo puti. Patent na izobretenie No. 2521095. Opubl. 27.06.2014. (In Russian.)
- [18] Candes, J., J. Romberg, and T. Tao. 2006. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans. Inform. Theory* 52:489–509.
- [19] Candes, J., and T. Tao. 2006. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? *IEEE Trans. Inform. Theory* 52(12):5406–5425.
- [20] Cai, J.-F., Z. Shen, and G.-B. Ye. 2011. Approximation of frame based missing data recovery. *Appl. Comput. Harmonic Anal.* 31(2):185–204.

- [21] Malenichev, A., V. Sulimova, O. Krasotkina, A. Markov, and V. Mottl. 2014. Automatic analysis of ultrasonic railway defectograms with uncontrolled regions. *Machine learning and data mining in pattern recognition*. Lecture notes in computer science ser. Springer. 8556:315–327.
- [22] Wang, D., L. Lu, and H. J. Zhang. 2003. Speech segmentation without speech recognition. *Conference (International) on Multimedia and Expo (ICME '03)*. 1:405–408.
- [23] Kehagias, A., E. Nidelkou, and V. Petridis. 2006. A dynamic programming segmentation procedure for hydrological and environmental time series // *Stochastic Environmental Res. Risk Assessment* 77–94.
- [24] Lavielle, M. 1998. Optimal segmentation of random processes. *IEEE Trans. Signal Proc.* 46(5):365–373.
- [25] Fearnhead, P. Exact Bayesian curve fitting and signal segmentation. 2005. *IEEE Trans. Signal Proc.* 53(6):2160–2166. doi: 10.1109/TSP.2005.847844.
- [26] Sasan, M., and S. Bayan. 2006. A nonlinear variational method for signal segmentation and reconstruction using level set algorithm. *Signal Proc.* 86(11):3496–3504.
- [27] Mico, P., M. Mora, D. Cuesta-Frau, and M. Aboy. 2010. Automatic segmentation of long-term ECG signals corrupted with broadband noise based on sample entropy. *Computer Methods Programs Biomedicine* 98(2):118–129.
- [28] Martens, R., and L. Claesen. 1996. On-line signature verification by dynamic time-warping. *13th IEEE Conference (International) on Pattern Recognition Proceedings*. 38–42.
- [29] Verbovoj, V. V. 2005. *Metriki dlya sravneniya zvukovykh signalov s uchetom osobennostey chelovecheskogo uha. Komp'yuternaya grafika i mul'timedia* 3:2–10. (In Russian.)
- [30] Wang, X., A. Mueen, H. Ding, G. Trajcevski, P. Scheuermann, and E. Keogh. 2013. Experimental comparison of representation methods and distance measures for time series data. *Data Mining Knowledge Discovery* 26(2):275–309.
- [31] Bellman, R., and R. Kalaba. 1969. *Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaya teoriya upravleniya*. Moscow: Nauka. 118 p. (In Russian.)
- [32] Jones, N. C., and P. A. Pevzner. 2004. *An introduction to bioinformatics algorithms*. The MIT Press. 435 p.
- [33] Salvador, S., and P. Chan. 2004. FastDTW: Toward accurate dynamic time warping in linear time and space. *KDD Workshop on Mining Temporal and Sequential Data*. 70–80.
- [34] Al-Naymat, G., S. Chawla, and J. Taheri. 2009. SparseDTW: A novel approach to speed up dynamic time warping. *The 2009 Australasian Data Mining* 101:117–127.

*Received June 14, 2015*