

# Беспризнаковое распознавание трещин на ранней стадии их развития по ультразвуковым дефектограммам рельсового пути

А.С. Жуков<sup>1</sup>, О.В. Красоткина<sup>2</sup>, В.В. Сулимова<sup>3</sup>, В.В. Моттль<sup>4</sup>, А.А. Марков<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Сбербанк России, ул. Вавилова 19, Москва, Россия, 117997

<sup>2</sup>Markov Processes International, 475 Springfield Ave, Suite 401, Summit, NJ 07901, USA

<sup>3</sup>Тульский государственный университет, пр. Ленина, 92, Тула, Россия, 300012

<sup>4</sup>Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Вавилова, 44, корп. 2, Москва, Россия, 119333

<sup>5</sup>ОАО "Радиоавионика", Троицкий пр., 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005

**Аннотация.** В данной работе предлагается двухэтапная схема распознавания трещин на ранней стадии их развития на основе анализа ультразвуковых дефектограмм рельсового пути. На первом этапе осуществляется быстрая примерная локализация участков рельсов, содержащих потенциальные дефекты. На втором этапе решается задача двухклассового распознавания фрагментов, содержащих трещины, на основе беспризнаковой реализации SVM. Сравнение фрагментов дефектограмм осуществляется на основе динамического временного выравнивания (DTW) с нестандартной мерой несходства их элементов, позволяющей учесть особенности решаемой прикладной задачи. Результаты экспериментов показывают, что предлагаемый подход позволяет достичь достаточно высокого качества распознавания ( $AUC = 0,82$ ).

## 1. Введение

Безопасность и экономичность перевозок являются основой концепции рационального технического обслуживания железных дорог. Для учета постоянно растущих требований к обеспечению безопасности необходимы достоверные и систематизированные сведения о состоянии пути, в частности, о наличии контактно-усталостных трещин, которые возникают в ходе эксплуатации и могут привести к изломам рельсов. В связи с этим, во избежание чрезвычайных ситуаций, важно обеспечить автоматическое выявление трещин на ранних стадиях их развития и своевременную замену рельсов [1, 2].

В мировой практике проблема обнаружения и определения параметров трещин сравнительно недавно нашла повышенный интерес многих ученых, однако решения данной проблемы средствами неразрушающего контроля до сих пор нет.

В настоящее время для неразрушающего контроля применяются акустический (ультразвуковой) [2] и магнитный методы [3].

Неразрушающий магнитный контроль дает возможность обнаруживать места возникновения усталостных трещин на ранней стадии их развития, однако этот метод может использоваться только для поиска дефектов небольшой глубины залегания [3]. Кроме того, магнитодинамические устройства имеют значительные габариты и массу намагничивающей системы, что ограничивает возможности применения данного метода.

Важным достоинством ультразвукового контроля, в отличие от магнитного, является возможность просмотра рельса по всей глубине и практически во всех проекциях. Единственным его недостатком считается возможное наличие непроконтролируемых участков, которые в большинстве случаев возникают вследствие временного плохого акустического контакта приемника ультразвукового сигнала с поверхностью исследуемого участка рельсового пути из-за неблагоприятных погодных условий [4, 5].

Для решения указанных проблем в некоторых работах предлагаются технологии совместного использования магнитодинамических и ультразвуковых методов [6].

Однако, поскольку в настоящее время в российской железнодорожной отрасли наиболее распространенными являются ультразвуковые средства контроля [7, 8], а проблема восстановления данных, пропущенных из-за временного плохого акустического контакта, может быть успешно решена алгоритмически согласно предложенному нами ранее подходу [9], то данная работа ориентирована на применение исключительно ультразвуковых средств контроля, а именно, съемных двухниточных дефектоскопов. На рисунке 1 приведен пример одного из современных дефектоскопов, используемых в ОАО «Российские железные дороги», представляющего собой управляемую оператором тележку, регистрирующую и отображающую на экране сигналы, по форме которых специально обученный оператор может определить наличие или отсутствие дефекта.

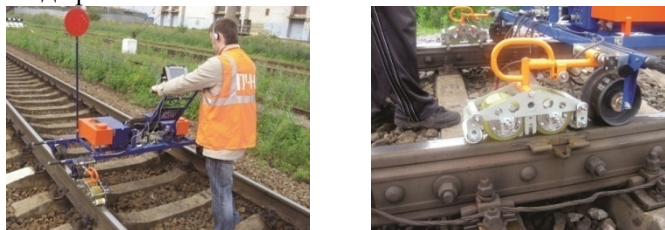


Рисунок 1. Современный двухниточный дефектоскоп АВИКОН-14.

Действие дефектоскопа основано на его передвижении вдоль поверхности катания рельса и посылке коротких ультразвуковых импульсов, которые, отражаясь от противоположной поверхности рельса, какого-либо дефекта или конструктивного отражателя в случае их наличия и регистрируются приемником.

Для обеспечения возможности обнаружения дефектов, имеющих разную форму и ориентацию, а также расположенных в различных местах рельса, обычно используют несколько ультразвуковых каналов, осуществляя ввод импульсов под разными углами.

Ультразвуковые дефектоскопы осуществляют регистрацию сигналов в виде дефектограмм (детальное описание принципа их формирования приведено в разделе 2). Существует специальное программное обеспечение для сбора и просмотра дефектограмм [10], однако их анализ на предмет наличия дефектов в рельсах в настоящее время производится российскими специалистами вручную, вследствие чего имеет невысокую эффективность [11].

Известен ряд работ, посвященных автоматическому анализу результатов ультразвукового контроля рельсов [12, 13, 14, 15 и др.], однако они не могут быть использованы российскими специалистами из-за специфики применяемых контролирующих устройств или условий, в который осуществляется контроль.

Основной задачей, решаемой в данной работе, является задача автоматического распознавания трещин в головке рельса по фрагментам ультразвуковых дефектограмм рельсового пути. Однако, поскольку изначально дефектограмма представляет собой непрерывный сигнал, зарегистрированный в процессе контроля достаточно больших участков рельсовых путей, то для решения данной задачи необходимо предварительно осуществить локализацию трещин на дефектограммах. Фактически, данная задача сводится к задаче разметки дефектограммы - выделению небольших фрагментов дефектограмм, являющихся подозрительными на наличие трещины и остальных участков, соответствующих отсутствию трещин.

Существует множество методов разметки речевых [16], биомедицинских [17] и других сигналов [18, 19]. Но они, как правило, имеют высокую вычислительную сложность, обусловленную решением более общей задачи по сравнению с рассматриваемой. Предложенный в [9] способ разметки, разработанный специально для дефектограмм, является значительно менее трудоемким по сравнению с методами сегментации общего вида, однако он ориентирован на выделение участков, соответствующих болтовым соединениям рельсов и существенно эксплуатирует предположение о том, что выделяемые фрагменты имеют примерно одинаковую длину. В результате, данный подход не может быть применен для выделения трещин, длина которых может существенно различаться.

В данной работе предложен достаточно простой и быстрый способ примерной локализации на дефектограмме участков, соответствующих потенциальным дефектам, в условиях отсутствия предположений об их длине.

Поскольку на практике оказывается сложно выделить формальные признаки фрагментов дефектограмм, содержащих трещины, то наиболее подходящим подходом к их анализу является беспризнаковый подход [21, 22], согласно которому каждый сигнал (фрагмент дефектограммы) представляется числовыми значениями его парных сравнений с другими фрагментами.

Известно множество способов сравнения дискретных сигналов [23, 24, 25]. Но, поскольку скорость движения дефектоскопа при ультразвуковом контроле рельсового пути в общем случае неравномерна и дефектограммы, полученные при прохождении даже по одному и тому же участку пути в общем случае имеют различную длину, то наиболее естественным способом их сравнения является подход, основанный на парном выравнивании сравниваемых сигналов, называемый Dynamic Time Warping (DTW) [23].

В данной работе сравнение фрагментов дефектограмм предлагается осуществлять на основе адаптированного метода динамического временного выравнивания (DTW) [23] с нестандартной мерой несходства элементов дефектограмм, впервые предложенной нами в работе [20] и позволяющей учесть особенности рассматриваемой задачи.

## **2. Представление результатов ультразвуковой дефектоскопии в виде ультразвуковой дефектограммы рельсового пути**

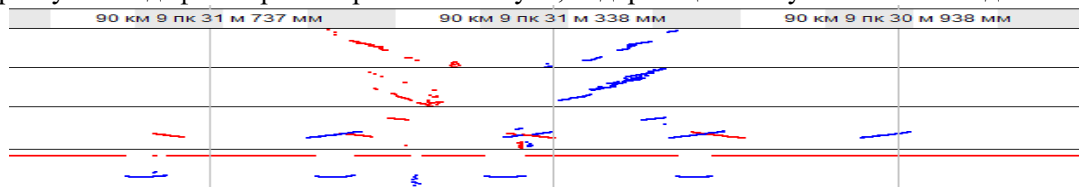
Традиционным способом представления сигналов, регистрируемых многоканальным дефектоскопом, является так называемая *B*-развертка - представление сигнала в координатной плоскости "время распространения ультразвуковых колебаний в рельсе - координата контролируемой нити пути" [7].

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, превышающей заданное пороговое значение.

Чаще всего, при хорошем акустическом контакте ультразвукового излучателя и приемника с контролируемой поверхностью, а так же наличии отражающей поверхности, расположенной под углом  $90^\circ$  к направлению распространения ультразвука, происходит однократное отражение сигнала, и дефектоскоп регистрирует один импульс. 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 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, отличающимся от  $90^\circ$ , импульс не будет зарегистрирован вовсе [11].

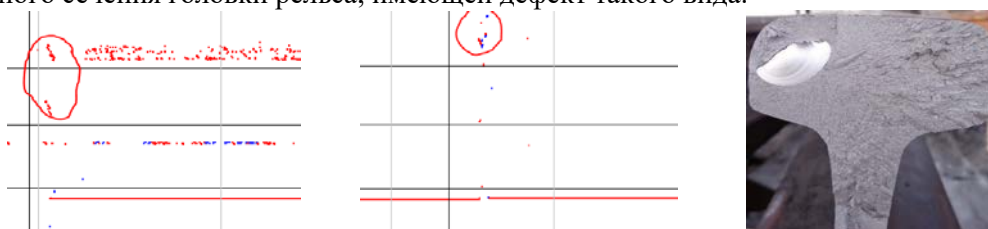
При наличии дефектов или каких-либо конструктивных отражателей (например, болтов при болтовом соединении рельсов) на дефектограмме появляются линии разной формы, ориентации и продолжительности в зависимости от вида объекта, оказавшегося на пути

распространения акустического сигнала. На рисунке 2 представлен пример фрагмента ультразвуковой дефектограммы рельсового пути, содержащего зону болтового соединения.



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

На рисунке 3 (слева и по центру) представлены примеры фрагментов дефектограмм участков рельсового пути, содержащих наиболее часто встречающегося на практике дефект - поперечную трещину головки рельса, справа на этом же рисунке приведены пример поперечного сечения головки рельса, имеющей дефект такого вида.



**Рисунок 3.** Примеры отображения поперечной трещины головки рельса на дефектограмме (слева и по центру) и пример среза рельса (справа) с таким дефектом.

### 3. Представление дефектограммы в виде многокомпонентного дискретного сигнала

При реализации многоуровневой  $B$ -развертки, 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  $(\tau_i, a_i) \in R^2, i = 1, \dots, n$ .

Практика показывает, что как правило, информации, полученной только по одному ультразвуковому каналу, оказывается недостаточно для принятия верного решения при анализе дефектограмм.

Для объединения информации, получаемой по разным ультразвуковым каналам в данной работе каждый элемент дефектограммы рассматривается как  $m$ -мерный вектор

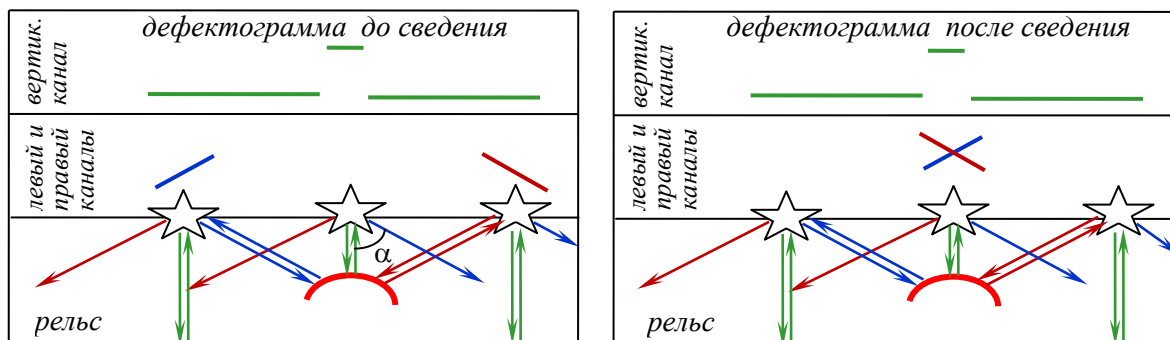
$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_m]^T, x_k = (\tau_i, a_i) \in R^2, i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m. \tag{1}$$

Таким образом, каждая дефектограмма оказывается представленной  $m$ -компонентным дискретным сигналом  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_x})$  некоторой длины  $N_x$ .

### 4. Процедура сведения дефектограммы

Следует обратить внимание, что данные, полученные многоканальным дефектоскопом, имеют следующую особенность: для любого элемента  $\mathbf{x}_s, s = 1, \dots, N_x$  дефектограммы индекс  $s$  характеризует положение датчиков в момент регистрации компонент, соответствующих разным каналам  $x_{s,1}, \dots, x_{s,m}$ , но каждая из этих компонент содержит информацию о различных участках рельсового пути.

Причиной этого является то, что все каналы имеют разные углы приема/передачи ультразвуковых импульсов. При этом только один канал (осуществляющий передачу импульса строго перпендикулярно к поверхности катания рельса) будет принимать сигнал, отразившийся от объекта, имеющего ту же координату, что и сам датчик. Для остальных каналов координата объекта не будет совпадать с координатой датчика и, соответственно, координатой, к которой будет привязан зарегистрированный импульс (рисунок 4 слева).



**Рисунок 4.** Иллюстрация идеи сведения дефектограммы.

Звездами на рисунке 4 выборочно отмечены три различных положения дефектоскопа в процессе его движения слева направо, стрелками - испускаемые и принимаемые ультразвуковые импульсы.

Основная идея сведения дефектограммы заключается в пересчете координат импульсов, зарегистрированных приемниками, так, чтобы они совпадали с координатами объекта, отразившего сигнал.

Пусть  $\alpha$  - угол (отсчитываемый от вертикали), под которым был отправлен ультразвуковой сигнал вдоль рельса по некоторому каналу и пусть принимающий датчик дефектоскопа, находясь на расстоянии  $s$  от точки начала пути, зарегистрировал отразившийся импульс с амплитудой  $a_s$  в условных единицах амплитуды [у.е.а.] через время  $\tau_s$  условных единиц времени [у.е.в.] после отправки. Пусть также  $\Delta\tau$  с / у.е.в. — постоянная, характеризующая соотношение между секундами и условными единицами времени дефектоскопа. Скорость распространения ультразвукового импульса, посланного под углом  $\alpha$ , будем обозначать  $V^\alpha$ .

Тогда координата  $t$  отразившего импульс объекта и, соответственно, новая координата импульса может быть определена по формуле  $t = s + (1/2)\tau_s \Delta\tau V^\alpha \sin \alpha$ .

Помимо координаты зарегистрированного импульса при сведении корректируется его задержка. В качестве нового значения задержки  $\tau_t$  принимается время, необходимое для получения отклика, если бы датчик находился в положении  $t$ :  $\tau_t = \tau_s (V^0 / V^\alpha) \cos \alpha$ , где  $V^0$  - скорость вертикального распространения импульса, т.е. под углом  $\alpha = 0$ . Амплитуда зарегистрированного импульса при сведении не корректируется:  $a_t = a_s$ .

Результат выполнения процедуры сведения схематично показан на рисунке 4 справа.

**5. Процедура разметки дефектограммы**

Под разметкой дефектограммы в данном случае понимается выделение фрагментов, которые могут содержать трещины и фрагментов, которые не содержат трещин. Предлагаемый алгоритм автоматического осуществления разметки заключается в следующем:

Шаг 0. Указатель начала участка находится на нуле, текущее количество пропусков равно 0, текущее количество точек участка, содержащего потенциальную трещину, равно 0.

Шаг 1. Двигаемся вдоль направления движения дефектоскопа. Если в текущей точке есть данные, ставим в нее указатель начала участка. Устанавливаем текущее число пропусков в 0.

Шаг 2. Двигаемся дальше, пока во всех следующих точках есть данные. Если встречается пропуск, увеличиваем текущее количество пропусков на 1.

Шаг 3. Если количество пропусков достигает определенного уровня  $M$  и указатель начала участка не на нуле (или мы достигли конца дефектограммы), то, если текущее количество точек фрагмента больше или равно  $K$ , то устанавливаем флаг конца участка и помечаем его как фрагмент, который может содержать трещину. Иначе сбрасываем счетчики и возвращаемся к пункту 1.

Шаг 4. Повторять 1-3, пока не достигнем конца дефектограммы.

## 6. Сравнение сигналов, представляющих фрагменты дефектограмм

### 6.1. Сравнение элементов дефектограммы

Очевидно, что сравнение сигналов, представляющих дефектограммы неизбежно должно базироваться на сравнении составляющих их элементов, причем от того, насколько удачно будет выбрана мера несходства элементов, во многом зависит и качество построенной на ее основе меры сравнения дефектограмм.

Поскольку, согласно описанному в разделе 3 представлению дефектограммы, каждый элемент по отдельному каналу представляет собой импульсный сигнал и может содержать несколько  $n = 0, 1, 2, \dots$  импульсов, то прямое сравнение элементов оказывается невозможным.

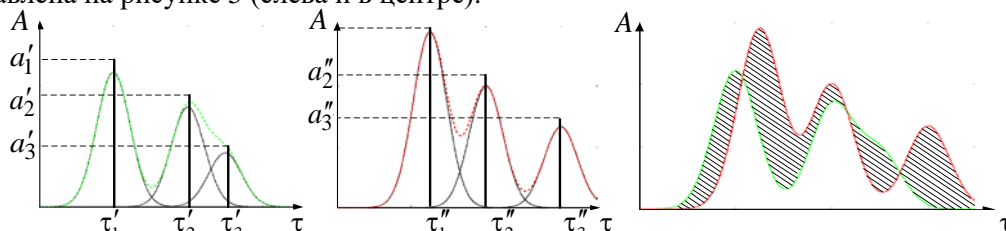
Поэтому в данной работе используется подход, впервые предложенный нами в [20], заключающийся в применении специальной математической модели для представления элементов дефектограмм в виде, удобном для их дальнейшего сравнения.

Согласно данной модели, каждый элемент дефектограммы по отдельному каналу описывается суммой нормальных распределений с некоторой дисперсией  $\sigma$  и математическим ожиданием, равным задержке соответствующего импульса  $\tau_i$ :

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

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

Графическая интерпретация данного способа представления элементов дефектограммы представлена на рисунке 5 (слева и в центре).



**Рисунок 5.** Графическое представление модели описания элемента дефектограммы по одному каналу (слева и в центре) и меры их несходства (справа).

Меру несходства двух элементов дефектограммы  $x' = (\tau_i', a_i') \in R^2, i = 1, \dots, n'$  и  $x'' = (\tau_i'', a_i'') \in R^2, i = 1, \dots, n''$  будем вычислять вслед за [20] по формуле:

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

что геометрически может быть интерпретировано как площадь фигуры, ограниченной графиками распределений, описывающих сравниваемые элементы (рис. 5 справа).

Мера несходства (3) может быть записана в следующем эквивалентном виде:

$$\varphi(x', x'') = \sqrt{\rho(x', x') + \rho(x'', x'') - 2\rho(x', x'')}, \quad \rho(x', x'') = \sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^{n''} a_i' a_j'' \exp\left(-(\tau_i' - \tau_j'')^2 / 2\sigma^2\right). \tag{4}$$

При этом несходство элемента дефектограммы  $x' = (\tau_i', a_i') \in R^2, i = 1, \dots, n'$  с нулевым элементом  $\phi = (0, 0)$ , не содержащим импульсов, может быть вычислено еще проще:

$$\varphi(x', \phi) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^{n''} a_i' a_j'' \exp\left(-(\tau_i' - \tau_j'')^2 / 2\sigma^2\right)}. \tag{5}$$

При данном способе сравнения 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 осуществляется путем введения расширенной меры несходства элементов дефектограммы, представляющей собой линейную комбинацию частных мер несходства (5):

$$r(\mathbf{x}', \mathbf{x}'') = \sum_{i=1}^m \alpha_i r(x'_i, x''_i), \quad \alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \tag{6}$$

где  $\mathbf{x}'$  и  $\mathbf{x}''$  – два  $m$ -мерных представления элементов дефектограмм согласно описанию (1).

Такой способ комбинирования не требует внесения изменений в общую схему сравнения дефектограмм и позволяет учитывать один или сразу несколько ультразвуковых каналов в зависимости от заданных коэффициентов  $\alpha_i$  линейной комбинации (6).

### 6.2. Сравнение двух сигналов, представляющих фрагменты дефектограмм

Сравнение фрагментов дефектограмм предлагается осуществлять на основе адаптированного метода динамического временного выравнивания (DTW) [23] с нестандартной мерой несходства элементов (6), позволяющей учесть особенности рассматриваемой задачи.

Пусть  $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_{N_X})$  и  $\mathbf{Y} = (y_1, \dots, y_{N_Y})$  – два многокомпонентных дискретных сигнала, представляющих фрагменты дефектограмм. Требуется каждому отсчету одного сигнала сопоставить некоторый отсчет из другого  $T = (t_i, i = 1, \dots, N_X)$ , где  $t_i \in \{1, \dots, N_Y\}$  – номер отсчета в сигнале  $\mathbf{Y}$ , соответствующий отсчету  $i$  в сигнале  $\mathbf{X}$ , причем  $t_1 = 1$  и  $t_{N_X} = N_Y$ .

Будем искать оптимальные парные соответствия, доставляющие минимум критерию оптимальности, предложенному нами в [20]:

$$J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T) = \sum_{t=1}^{N_X} \gamma(t_{i-1}, t_i), \quad \gamma(t_{i-1}, t_i) = \begin{cases} \beta |t_i - t_{i-1} - 1| + \sum_{j=t_{i-1}+1}^{t_i} r^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j), & t_i \geq t_{i-1}, \\ \infty, & t_i < t_{i-1}, \end{cases} \tag{7}$$

где  $\beta > 0$  – штраф на непараллельные ссылки, соответствующие локальным сжатиям или растяжениям осей сигналов при выравнивании.

Оптимальное выравнивание  $\hat{T}$  может быть найдено при помощи процедуры динамического программирования [26], а корень из соответствующего значения критерия  $J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \hat{T})$  имеет смысл несходства сравниваемых сигналов:

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sqrt{J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \hat{T})}, \quad \hat{T} = \arg \min J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T). \tag{8}$$

В работе [20] приведен последовательный алгоритм вычисления оптимального значения критерия (7), а в работе [27] – его параллельная реализация на основе технологии CUDA.

## 7. Распознавание трещин по фрагментам ультразвуковых дефектограмм

Исходными данными для данного исследования, предоставленными ОАО "Радиоавионика", являются дефектограммы нескольких участков рельсового пути, содержащих в совокупности 27 поперечных трещин головки рельса – наиболее часто встречающегося дефекта.

К исходным дефектограммам была применена процедура фильтрации (удалены импульсы с низким значением амплитуды, зашумляющие сигнал). Далее были осуществлены сведение (в соответствии с разделом 4) и разметка (в соответствии с разделом 5). Экспериментально было установлено, что оптимальными значениями параметров алгоритма разметки являются  $M = 7$  и  $K = 5$ . Сведение и разметка (также, как и последующее распознавание) осуществлялись на основе информации из каналов 2-5, поскольку на других каналах 0,1,6 и 7 информация о дефектах анализируемого типа не может быть зарегистрирована.

В результате из исходных дефектограмм было вырезано  $N = 324$  фрагмента, в том числе 27 фрагментов, содержащих трещины, и 297 фрагментов, не содержащих трещины.



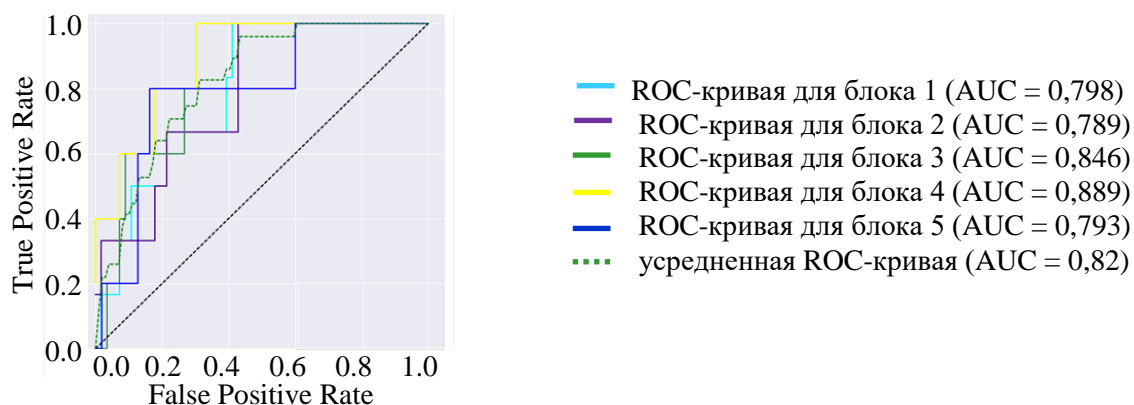
Для всех пар вырезанных фрагментов вычислены значения их несходства (согласно разделу б)  $d(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j), i, j = 1, \dots, N$ . В качестве метода обучения распознаванию был выбран метод опорных векторов (SVM) [28] - один из наиболее удобных и эффективных линейных методов анализа данных. Для введения нелинейности при построении решающего правила было выполнено преобразование  $K(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \exp[-\gamma d^2(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j)]$ . При выбранном значении  $\gamma = 0,05$  матрица  $[K(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j), i, j = 1, \dots, N]$  оказалась неотрицательно определенной, что обеспечило возможность ее использования вслед за [29] в роли матрицы скалярных произведений в SVM без дополнительных преобразований.

Контроль качества обучения осуществлялся на основе кроссвалидации по 5 случайно сгенерированным непересекающимся блокам исходной выборки, т.е. обучение осуществлялось 5 раз по 4 блокам и 1 оставшийся блок использовался для контроля. Усредненные по 5 блокам показатели AUC (площадь под ROC-кривой), зафиксированные при различных значениях параметра  $C$  метода опорных векторов, приведены в таблице 1. Для всех значений параметра  $C$  использовалось одинаковое разбиение на блоки.

**Таблица 1.** Результаты распознавания трещин при разных значениях параметра  $C$ .

$C$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
AUC	0,811	0,812	0,815	0,816	0,820	0,799	0,802	0,803	0,791	0,774

На рисунке 6 представлены ROC кривые для оптимального значения параметра  $C = 1$ .



**Рисунок 6.** ROC-кривые для оптимального значения параметра  $C = 1$ .

### 8. Заключение

В данной работе предлагается двухэтапная схема распознавания трещин на основе анализа ультразвуковых дефектограмм рельсового пути. На первом этапе осуществляется быстрая примерная локализация участков рельсов, содержащих потенциальные дефекты. На втором этапе решается задача двухклассового распознавания выделенных фрагментов дефектограмм на фрагменты, содержащие и не содержащие трещины. Сравнение фрагментов дефектограмм осуществляется на основе динамического временного выравнивания (DTW) с нестандартной мерой сравнения элементов дефектограмм, позволяющей учесть особенности решаемой прикладной задачи. Классификация осуществляется на основе беспризнаковой реализации метода опорных векторов (SVM). Результаты экспериментов показывают, что предлагаемый подход позволяет достичь достаточно высокого качества распознавания (AUC = 0,82). Быстрая процедура локализации дефектов совместно с высокопроизводительной реализацией сравнения фрагментов дефектограмм с применением технологии CUDA делает данный подход применимым для анализа больших массивов данных.



## 9. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 15-07-08967, 17-07-00993, 18-07-01087.

## 10. Литература

- [1] Jimenez-Redondo, N. Automated and cost effective maintenance for railway (ACEM-Rail) / N. Jimenez-Redondo, N. Bosso, L. Zeni, A. Minardo, F. Shubert, F. Heinicke, A. Simrothhubert // *Procedia Social Behavioral Sci.* – 2012. – Vol. 48. – P. 1058-1067.
- [2] Марков, А.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. 2-е изд. перераб. и доп. / А.А. Марков, Д.А. Шпагин. – СПб: Образование. Культура, 2013. – 284 с.
- [3] Марков, А.А. Магнитодинамический метод контроля рельсов / А.А. Марков, А.Г. Антипов // *В мире НК.* – 2012. – №3(57). – С. 66-71.
- [4] Марков, А.А. Расшифровка дефектограмм ультразвукового контроля рельсов / А.А. Марков, А.Б. Козьяков, Е.А. Кузнецова. – СПб, 2006. – 206 с.
- [5] Марков, А.А. Об акустическом контакте в зоне болтовых стыков / А.А. Марков, В.С. Гараева // *Путь и путевое хозяйство.* – 2008. – №12. – С. 15-17.
- [6] Марков, А.А. Способ диагностики рельсового пути / А.А. Марков, Е.А. Кузнецова, А.Г. Антипов, А.Ю. Веревкин // Патент на изобретение №2521095. Оpubл. 27.06.2014.
- [7] Марков, А.А. Утраченные и новые технологии контроля рельсов / А.А. Марков, А.Б. Козьяков, Е.А. Кузнецова, Д.А. Шпагин // *Путь и путевое хозяйство.* – 2013. – №8. – С. 2-9.
- [8] Марков, А.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 2. Расшифровка дефектограмм / А.А. Марков, Е.А. Кузнецова. – СПб: УльтраПринт, 2014. – 332 с.
- [9] Чепрасов, Д.Н. Восстановление пропущенных данных на ультразвуковых дефектограммах рельсового пути на основе локально-глобального выравнивания / Д.Н. Чепрасов, А.А. Маленичев, В.В. Сулимова, О.В. Красоткина, В.В. Моттль, А.А. Марков // *Машинное обучение и анализ данных.* – 2015. – Т. 1, № 12. – С. 1731-1751.
- [10] Шилов, М.Н. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение регистрации и анализа дефектограмм при ультразвуковом контроле рельсов. Дисс. к. т. н. / М.Н. Шилов. – СПб, 2007.
- [11] Федоренко, Д.В. Проблемы автоматизации расшифровки сигналов многоканального ультразвукового контроля рельсов / Д.В. Федоренко // *Радиоэл. компл. многоцел. назн-я: сб. н. тр. юб. вып. ОАО «Радиоавионика».* – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. – С. 117-120.
- [12] Jemec V. Automated non-destructive testing and measurement systems for rails / V. Jemec, J. Grum // *10th European Conference on Non-Destructive Testing.* – Moscow, 2010. URL: [www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_10\\_42.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_10_42.pdf).
- [13] Heckel, T. High speed non-destructive rail testing with advanced ultrasound and eddy-current testing techniques / T. Heckel, H. Thomas, M. Kreutzbruck, S. Ruhe // *Indian National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation. NDE, 2009.*
- [14] Jiao, S.X. Development of an automated ultrasonic testing system / S.X. Jiao, S.B. Wong // *Nanyang Technological University, Singapore, Proceedings SPIE (International Society of Optical Engineers) Singapore.* – 2004. – Vol. 5852. – P. 480-486.
- [15] Sun, M. Non-destructive Photoacoustic Detecting Method for High-speed Rail Surface Defects / M. Sun, X. Lin, Z. Wu, Y. Liu, Y. Shen, N. Feng // *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, IEEE International, 2014.* –P. 896-900.
- [16] Wang, D. Speech segmentation without speech recognition / D. Wang, L. Lu, H.J. Zhang // *International Conference on Multimedia and Expo (ICME '03).* – 2003. – Vol. 1. – P. 405-408.
- [17] A dynamic programming segmentation procedure for hydrological and environmental time series / A. Kehagias, E. Nidelkou, V. Petridis // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* – 2006. – Vol. 20. – P.77-94.

- [18] Fearnhead, P. Exact Bayesian curve fitting and signal segmentation / P. Fearnhead // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2005. – Vol. 53(6). – P. 2160-2166.
- [19] Sasan, M. A nonlinear variational method for signal segmentation and reconstruction using level set algorithm / M. Sasan, B.S. Sharif // Sig. Proc. – 2006. – Vol. 86(11). – P. 3496-3504.
- [20] Malenichev, A. Automatic Analysis of Ultrasonic Railway Defectograms with Uncontrolled Regions / A. Malenichev, V. Sulimova, O. Krasotkina, A. Markov, V. Mottl // Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8556. – P. 315-327.
- [21] Duin, R.P.W. Experiments with a featureless approach to pattern recognition / R.P.W. Duin, D. De Ridder, D.M.J. Tax // Pattern Recognition Letters. – 1997. – Vol. 18(11-13). – P. 1159-1166.
- [22] Mottl, V.V. Featureless Pattern Recognition in an Imaginary Hilbert Space and Its Application to Protein Fold Classification / V.V. Mottl, S.D. Dvoenko, O.S. Seredin, C.A. Kulikowski, I.B. Muchnik // Proc. of the II-th Int. Workshop on MLDM in Pat. Rec., 2001. – P. 322-336.
- [23] Marten, R. On-line signature verification by dynamic time-warping / R. Martens, L. Claesen // IEEE: ICPR, 1996. – P. 38-42.
- [24] Wang, X. Experimental comparison of representation methods and distance measures for time series data / X. Wang // Data Mining and Knowledge Discovery, 2010. – P.1-35.
- [25] Вербовой, В. Метрики для сравнения звуковых сигналов с учетом особенностей человеческого слуха / В. Вербовой // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2005. – №3 – С. 2-10.
- [26] Беллман, Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Беллман, Р. Калаба. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
- [27] Жуков, О.С. Быстрый алгоритм совмещения ультразвуковых дефектограмм рельсового пути / О.С. Жуков, А.А. Маленичев, О.В. Красоткина, В.В. Сулимова // Труды XVIII Междунар. конф. DAMDID/RCDL'2016 «Аналитика и управ данными в областях с интенсивным использованием данных». – М.: Торус Пресс, 2016.
- [28] Vapnik, V.N. Statistical Learning Theory / V.N. Vapnik. – Wiley-Interscience, 1998. –768 p.
- [29] Mottl, V. Signature verification based on fusion of on-line and off-line kernels / V. Mottl, M. Lange, V. Sulimova, A. Yermakov // 19-th Intern. Conf. on Pattern Recognition, Florida, Tampa, 2008.

## Featureless rail flaw recognition using ultrasonic testing

A.S. Zhukov<sup>1</sup>, O.V. Krasotkina<sup>2</sup>, V.V. Sulimova<sup>3</sup>, V.V. Mottl<sup>4</sup>, A.A. Markov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Leninskie gory, 1, Moscow, Russia, 119991

<sup>2</sup>Markov Processes International, 475 Springfield Ave, Suite 401, Summit, NJ 07901, USA

<sup>3</sup>Tula State University, Lenin Ave.,92, Tula, Russia, 300012

<sup>4</sup>Computing Center of the RAS, Vavilov st. 40, Moscow, Russia, 119333

<sup>5</sup>Radioavionica corporation, Troitskiy pr., 4B, Saint-Petersburg, Russia, 190005

**Abstract.** This paper deals with recognition of defects on the basis of ultrasonic defectogram analysis. The proposed approach is realized in two steps. The first step involves a simple enough procedure for finding regions of ultrasonic defectogram, that could contain defects. The second stage allows to classify detected regions as defects of some types or not defects. Classification is based on featureless version of Support Vector Machines. Comparing of fragments of defectograms is implemented via dynamic time warping (DTW) procedure, that have been adopted for ultrasonic defectograms. Fast algorithm for defectogram segmentation and CUDA implementation of defectogram's fragments comparison possess the possibility for processing big amounts of data. The experiments shows that the proposed approach allows to reach high enough recognition quality on real data (0.82 AUC).

**Keywords:** Rail flaw recognition, ultrasonic inspection, defectogram segmentation, DTW, SVM, CUDA.