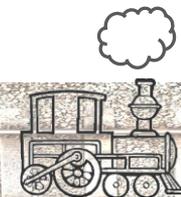


Восстановление пропущенных данных на ультразвуковых дефектограммах рельсового пути на основе локально-глобального выравнивания

- ¹ Чепрасов Дмитрий Николаевич , tcheprasov.mitya@yandex.ru
- ¹ Маленичев Антон Александрович, malenichev@mail.ru
- ¹ **Сулимова Валентина Вячеславовна**, vsulimova@yandex.ru
- ¹ Красоткина Ольга Вячеславовна, o.v.krasotkina@yandex.ru
- ² Моттль Вадим Вячеславович, vmottl@yandex.ru
- ³ Марков Анатолий Аркадиевич, amarkovspb@gmail.com

- 1. Тульский государственный университет, Тула, Россия
- 2. Вычислительный центр РАН, Москва, Россия
- 3. ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Россия



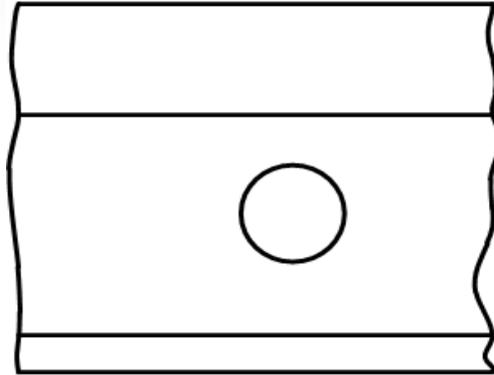
Ультразвуковая дефектоскопия рельсов



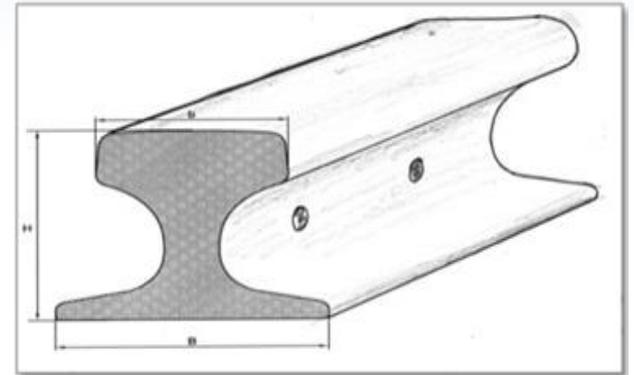
Современный съемный двухниточный дефектоскоп АВИКОН-14



Физический смысл ультразвуковой дефектоскопии



Вид сбоку рельса



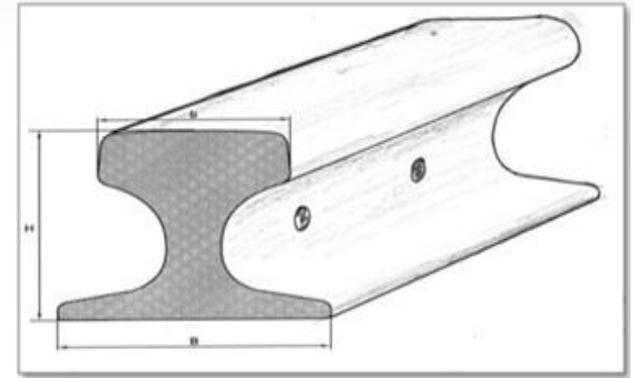
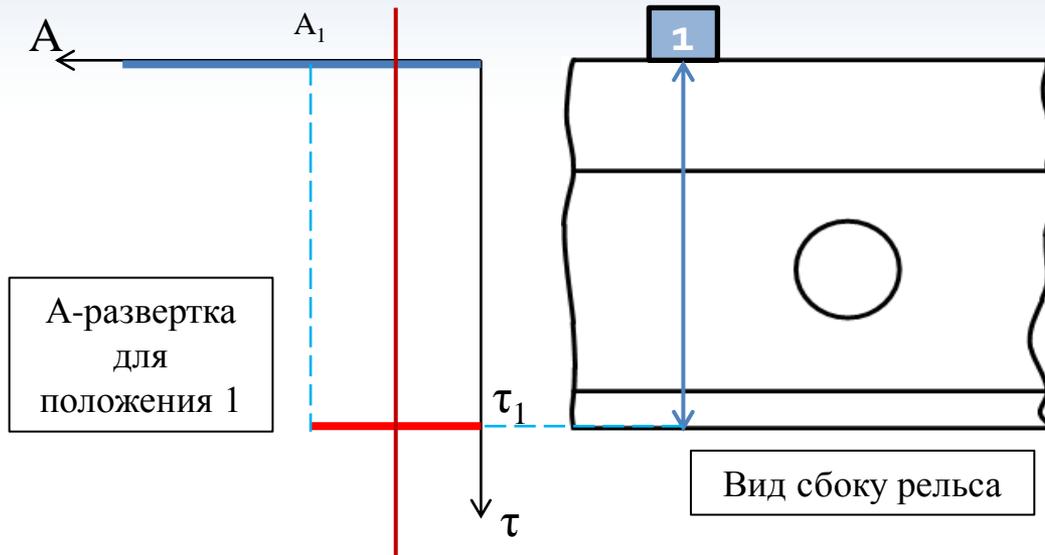
рельс



Физический смысл ультразвуковой дефектоскопии

A – Амплитуда

τ – Задержка ультразвукового сигнала



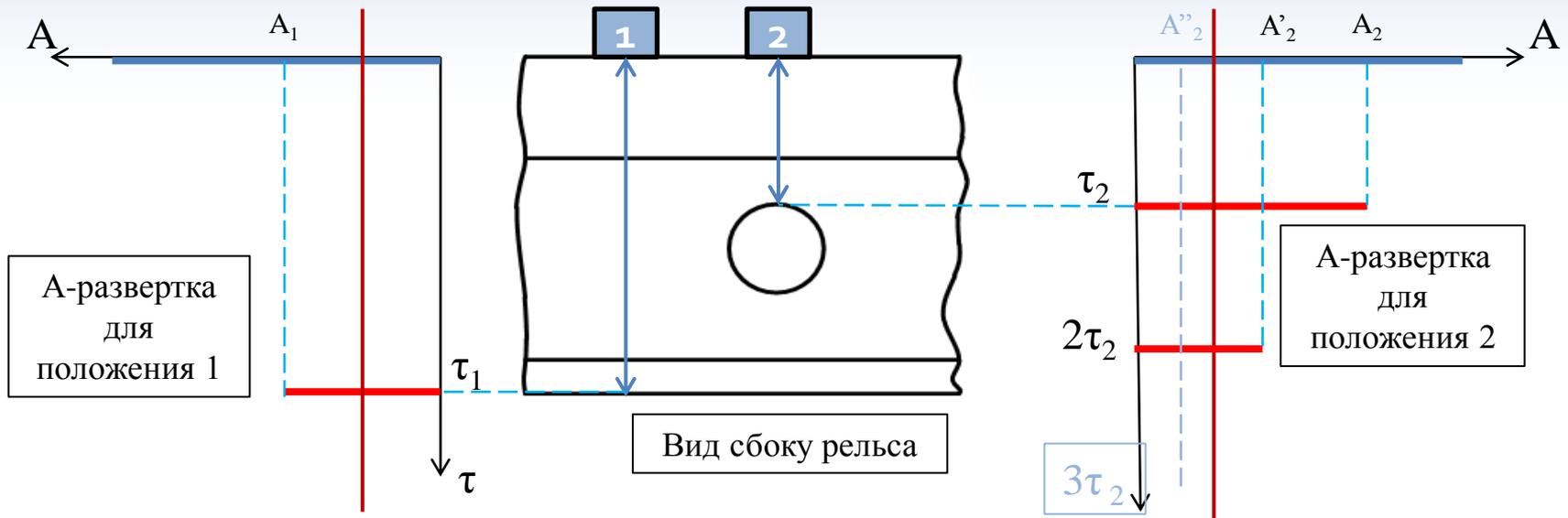
рельс



Физический смысл ультразвуковой дефектоскопии

A – Амплитуда

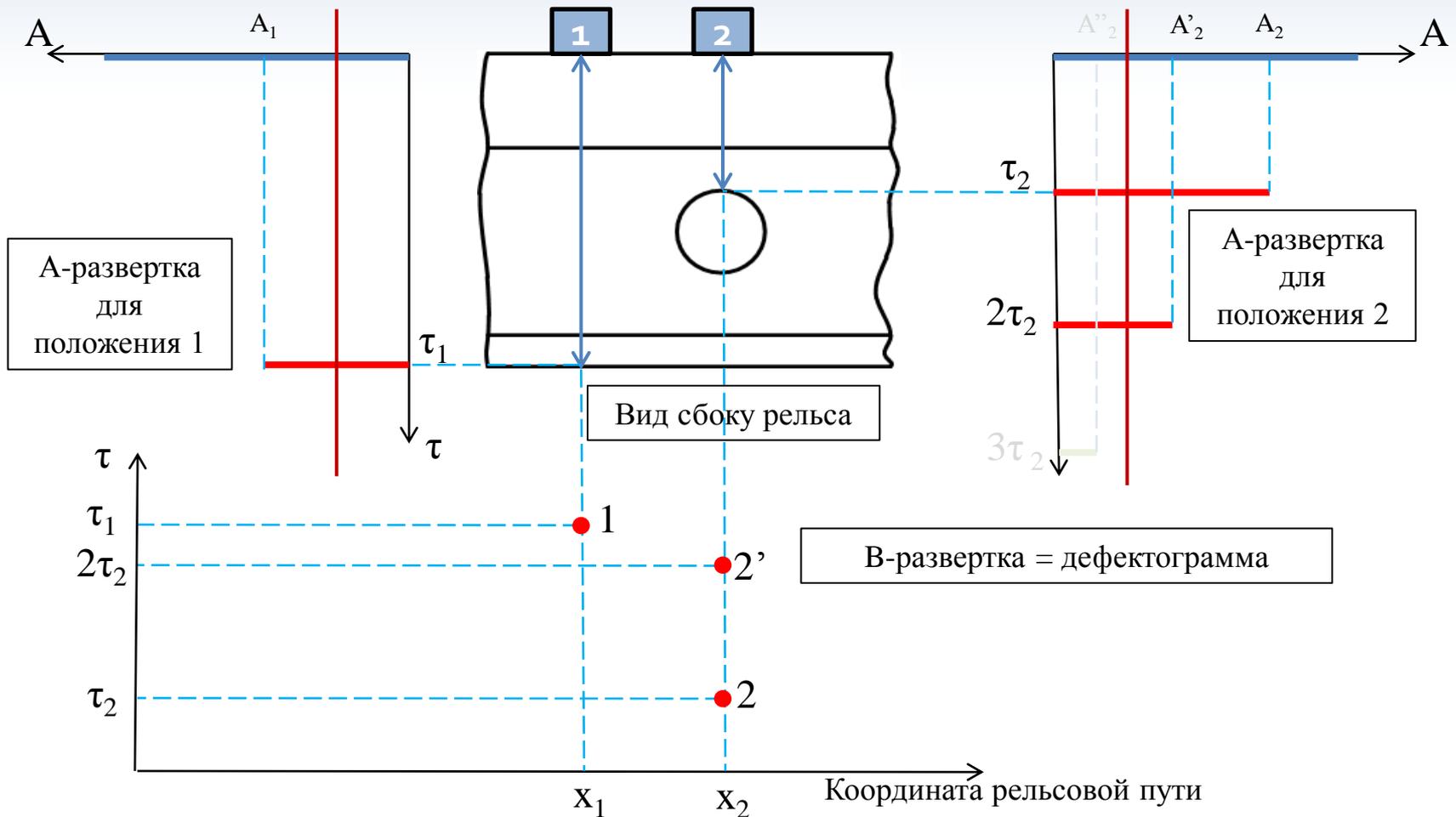
τ – Задержка ультразвукового сигнала



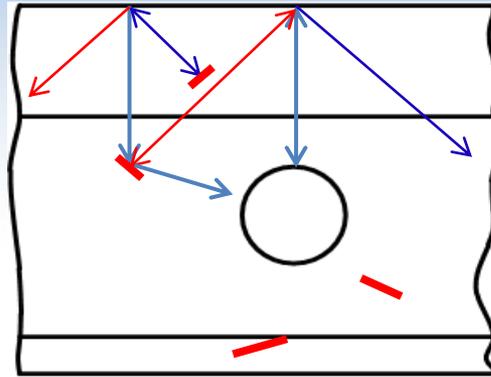
Физический смысл ультразвуковой дефектоскопии

A – Амплитуда

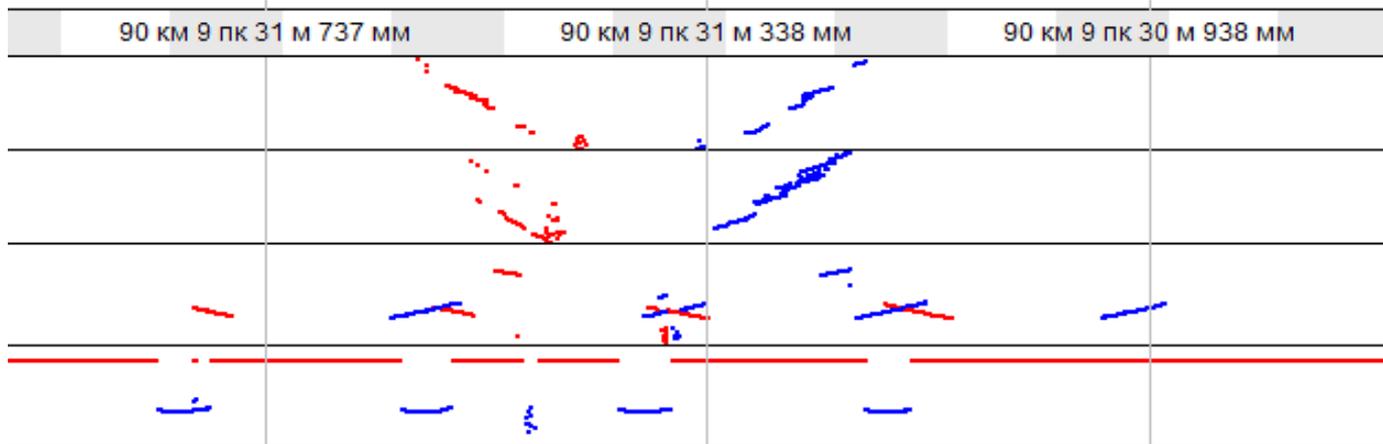
τ – Задержка ультразвукового сигнала



Физический смысл ультразвуковой дефектоскопии



Для обнаружения дефектов разного местоположения и ориентации используют **несколько каналов с разными углами ввода импульсов**



Пример фрагмента дефектограммы зоны болтового соединения рельсов, полученной по нескольким каналам

При наличии дефектов или конструктивных отражателей на дефектограмме появляются линии разной формы и продолжительности



Изломы рельсов из-за необнаружения дефектов

Длина рельсового пути РЖД:	~ 86 000 км.
Периодичность контроля:	2-4 раза в месяц
Ежегодно контролируется:	~ 4 500 000 км
Результат контроля 1 км:	~500 000 отсчетов
Число изломов рельсов в год:	40-60



Излом рельса

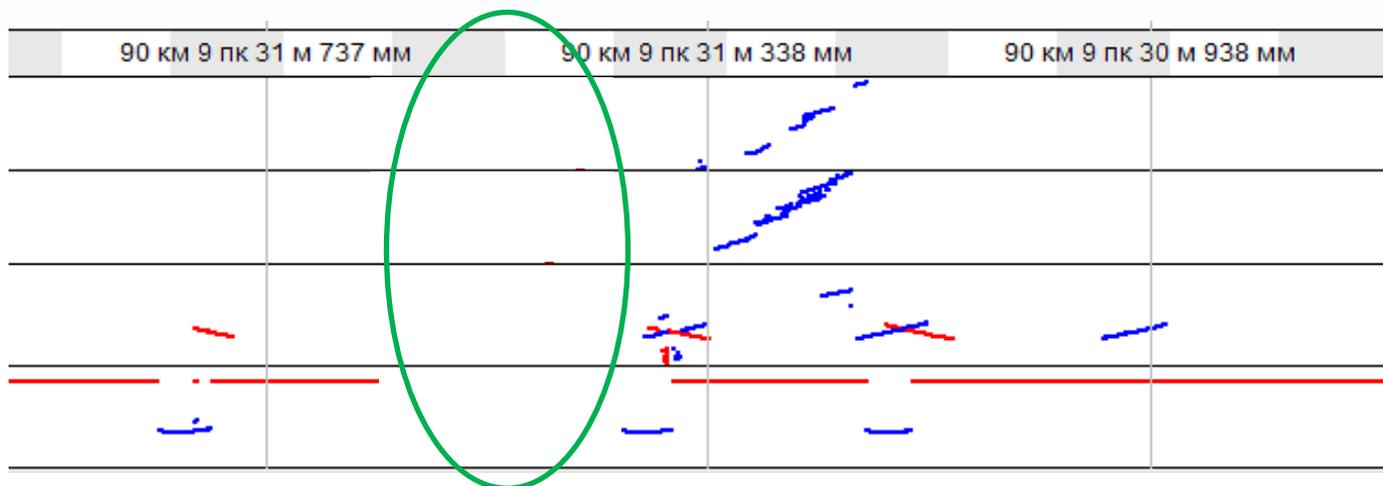


*Крушение грузового поезда в Карелии в марте 2013.
Причина крушения - излом рельса
из-за необнаруженной трещины*

Пропуски данных ультразвукового контроля

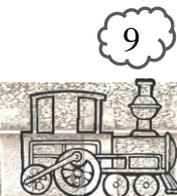
Одна из основных причин необнаружения дефектов:

пропуски данных ультразвукового контроля – участки рельсового пути, на которых ультразвуковой сигнал не был зарегистрирован



Возможные причины появления непроконтролированных участков:

- повреждение поверхности рельсов или неровное их соединение
- высокая скорость движения дефектоскопа
- временный плохой акустический контакт дефектоскопа с рельсом (например, из-за плохих погодных условий)



Пути решения проблемы пропусков данных на ультразвуковых дефектограммах рельсов

В большинстве работ данная проблема даже не поднимается

Шилов М.Н. *Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение регистрации и анализа дефектограмм при ультразвуковом контроле рельсов: / Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. СПб., 2007.*

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*

Jarmulak J., Kerchoffs E. *Case-based reasoning for interpretation of data from Non-destructive testing - Engineering Applications of Artificial Intelligence - 2001. Vol.14. No. 4. pp. 401–417*

Jemec V., Grum J. *Automated Non-Destructive Testing and Measurement Systems for Rails - ECNDT, 2010*

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 and BEHAVIORAL SCIENCES - 2012. vol. 48. pp. 1058–1067*

Sawadisavi, S., J. Edwards, E. Resendiz, J.M. Hart, C.P.L Barkan, Ahuja, N. (2009) *MachineVision Inspection of Railroad Track. Proceedings of the TRB 88th Annual Meeting, Washington, DC, January 2009*

Papaelias M., Roberts C., Davis C. *A review on nondestructive evaluation of rails: state-of the art and future development // Proc. IMechE. Vol. 222. Part F J. Rail and Rapid Transit - 2008. C.367–384*

Sambath, S., Nagaraj, P., Selvakumar, N. (2011). *Automatic Defect Classification in Ultrasonic NDT Using Artificial Intelligence. Journal of Nondestructive Evaluation, Volume 30, Number 1, pp. 20-28.*

и др.



Пути решения проблемы пропусков данных на ультразвуковых дефектограммах рельсов

Применение магнитодинамических методов

Марков А.А., Антипов А.Г. Магнитодинамический метод контроля рельсов // В мире НК. - 2012. № 3(57). С.66–71

Недостатки: возможность обнаружения дефектов только в верхней части головки рельсов; значительные габариты и масса устройств; невозможность использования на съемных устройствах

Комбинированные технологии

Объединение ультразвуковых и магнитодинамических методов

Марков А.А., Кузнецова Е.А., Антипов А.Г., Вережкин А.Ю. Способ диагностики рельсового пути. Патент на изобретение № 2521095. Оpubл. 27.06.2014

Недостатки: дополнительные затраты на разработку и внедрение новых устройств и взамен широко используемых УЗ дефектоскопов



Пути решения проблемы пропусков данных на ультразвуковых дефектограммах рельсов

На практике (РЖД):

1) Повторный выход оператора на непроконтролированный участок
недостатки: дополнительные временные и материальные затраты

Марков А.А., Шпагин Д.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. 2-е изд. перераб. и доп. - СПб.: Образование – Культура, 2013. 284 с.

2) анализ (вручную) дефектограммы с предыдущего прохода по тому же участку
основание: в 75% случаев предыдущий контроль того же участка не содержит пропусков данных

предположение: в силу частого контроля (2-4 раза в месяц) состояние рельсов изменилось не сильно (если появился дефект, то он еще не критичен)

недостатки: отсутствие автоматизации

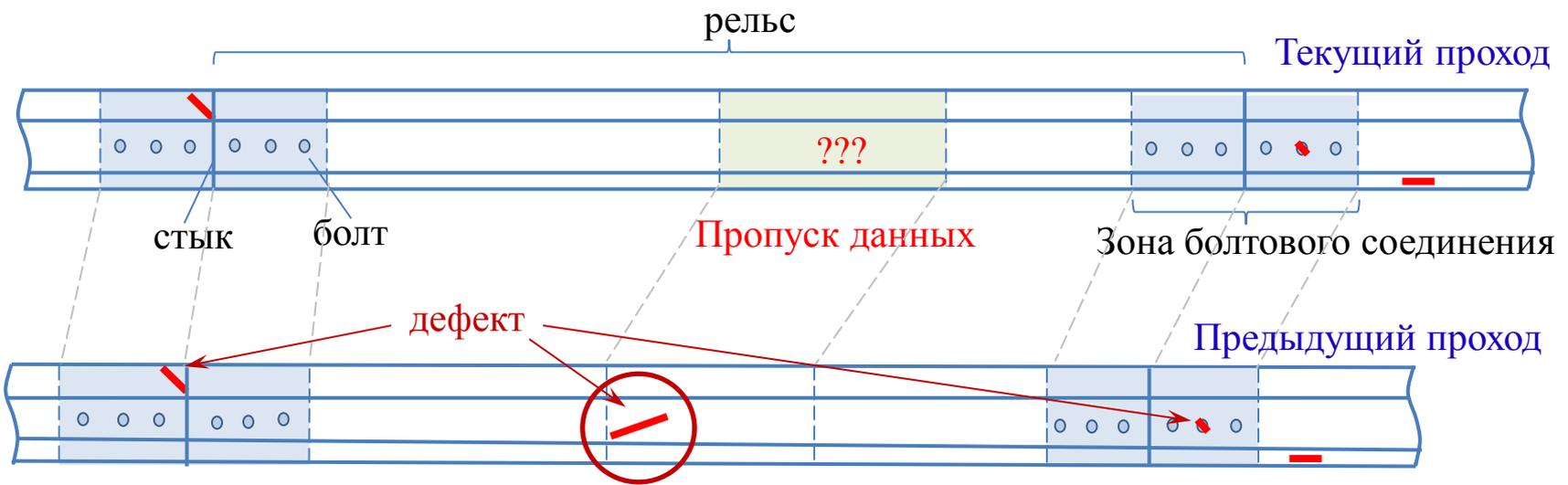
Марков А.А., Козьяков А.Б., Кузнецова Е.А., Шпагин Д.А. "Утраченные" и новые технологии контроля рельсов. // Путь и путевое хозяйство, 2013. № 8. С. 2–9.



Задача восстановления пропусков данных на ультразвуковой дефектограмме

Необходимо:

на дефектограмме предыдущего прохода найти область, соответствующую пропуску данных на дефектограмме текущего прохода

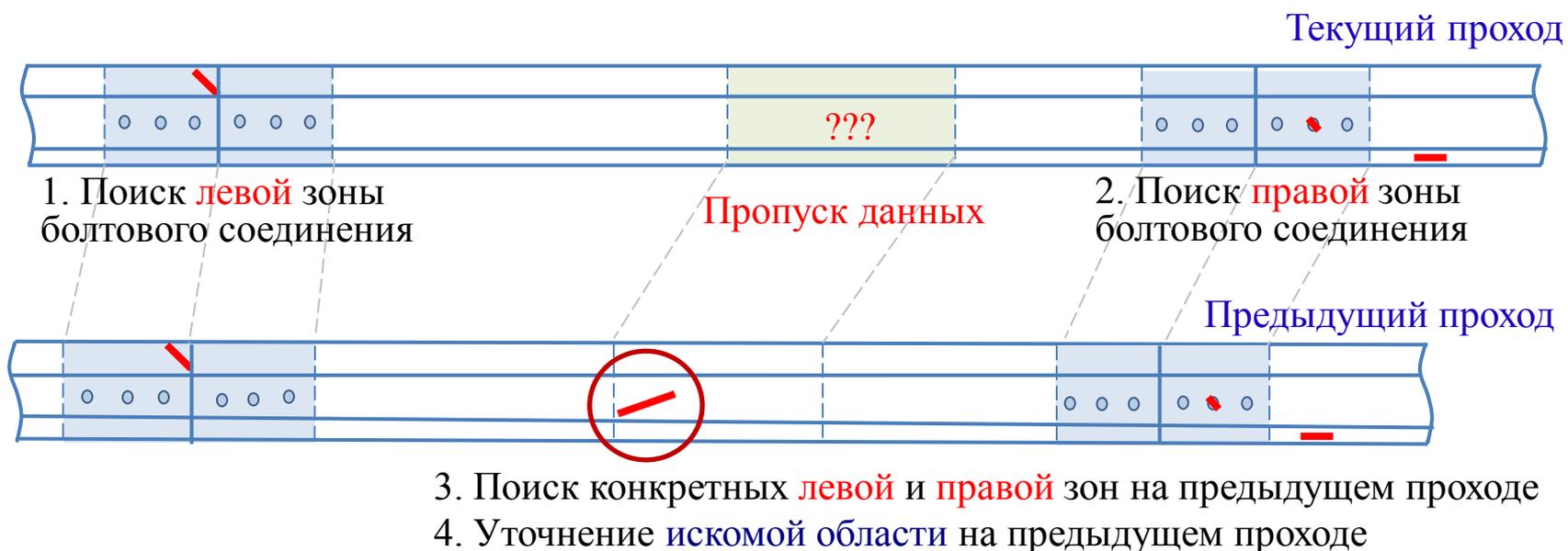


Основание: в 75% случаев результаты предыдущего контроля того же участка не содержат пропусков данных

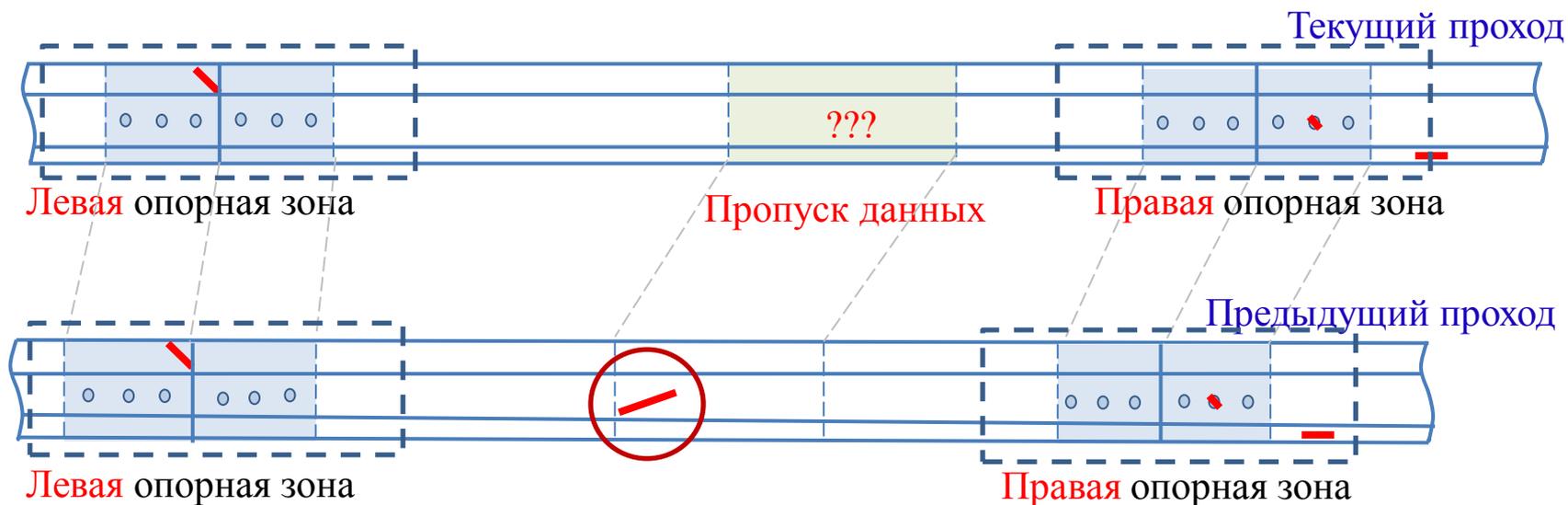
Предположение: в силу частого контроля (2-4 раза в месяц) состояние рельсов изменилось не сильно (если появился дефект, то он еще не критичен)



Основной принцип восстановления пропущенных данных на дефектограмме

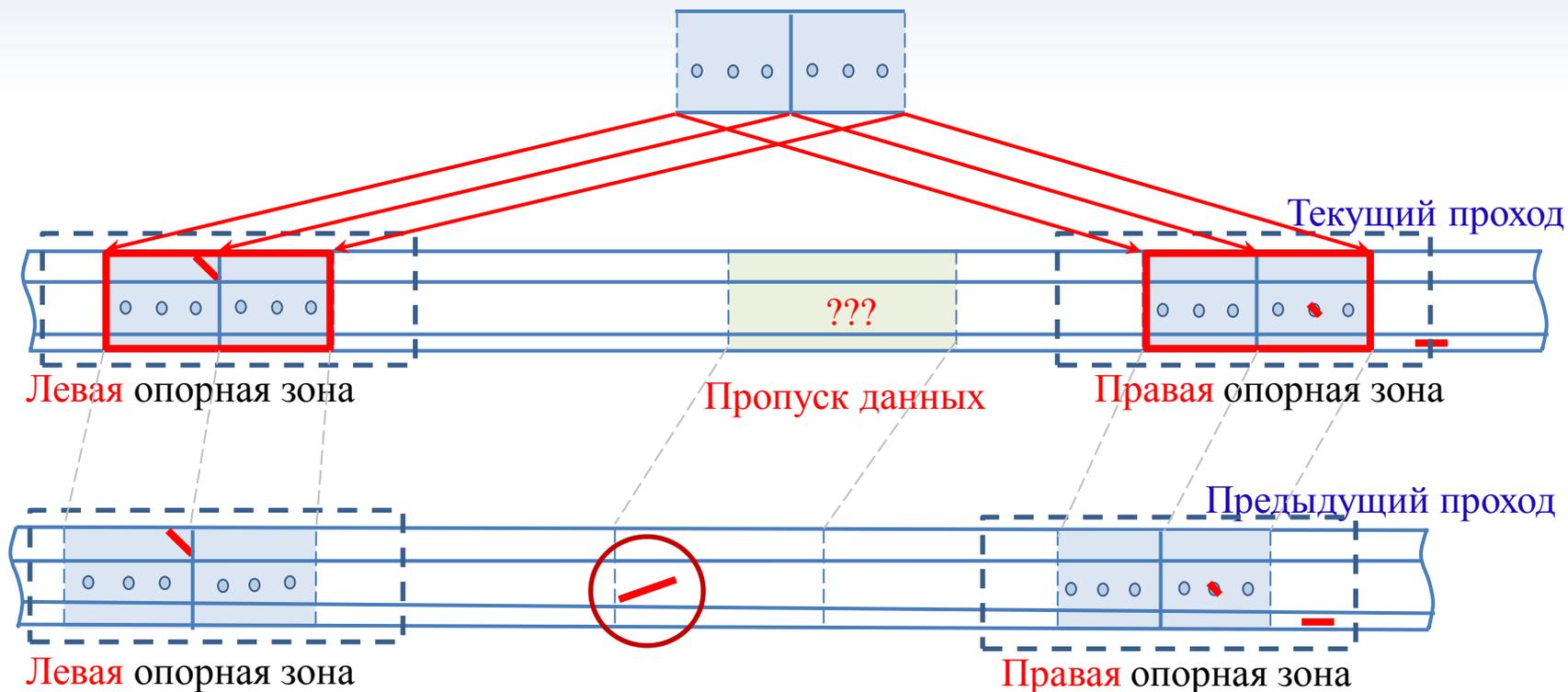


Быстрая примерная локализация опорных зон болтовых соединений

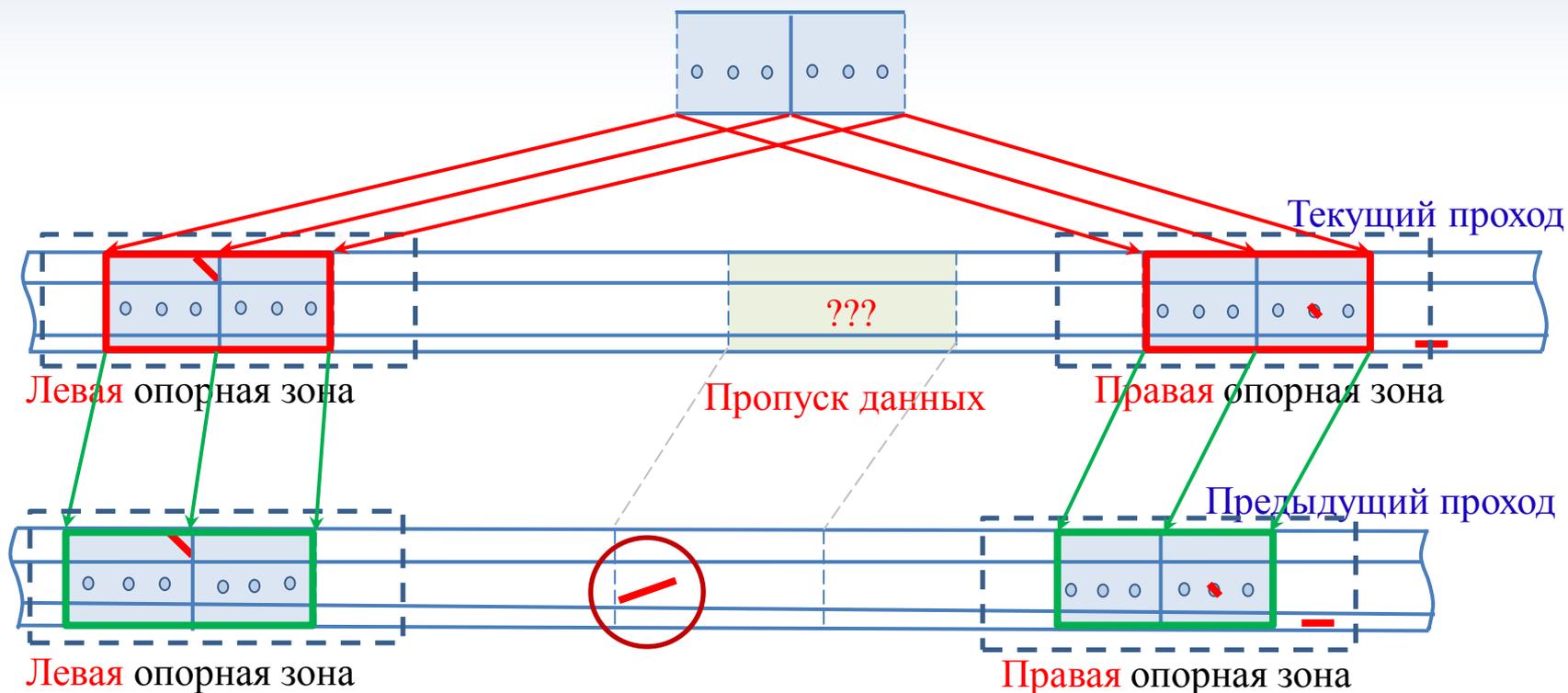


Уточнение положения опорных зон на текущей дефектограмме

типовая зона болтового соединения



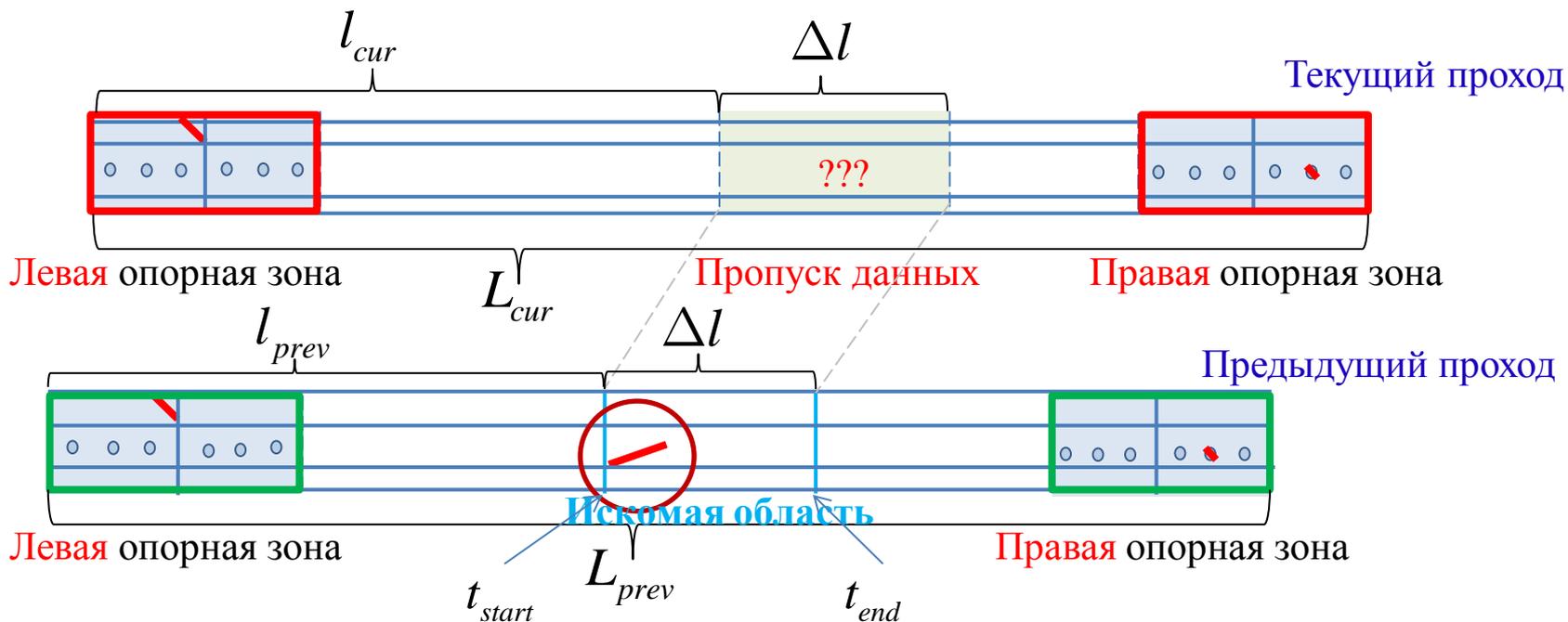
Уточнение положения опорных зон на дефектограмме предыдущего прохода



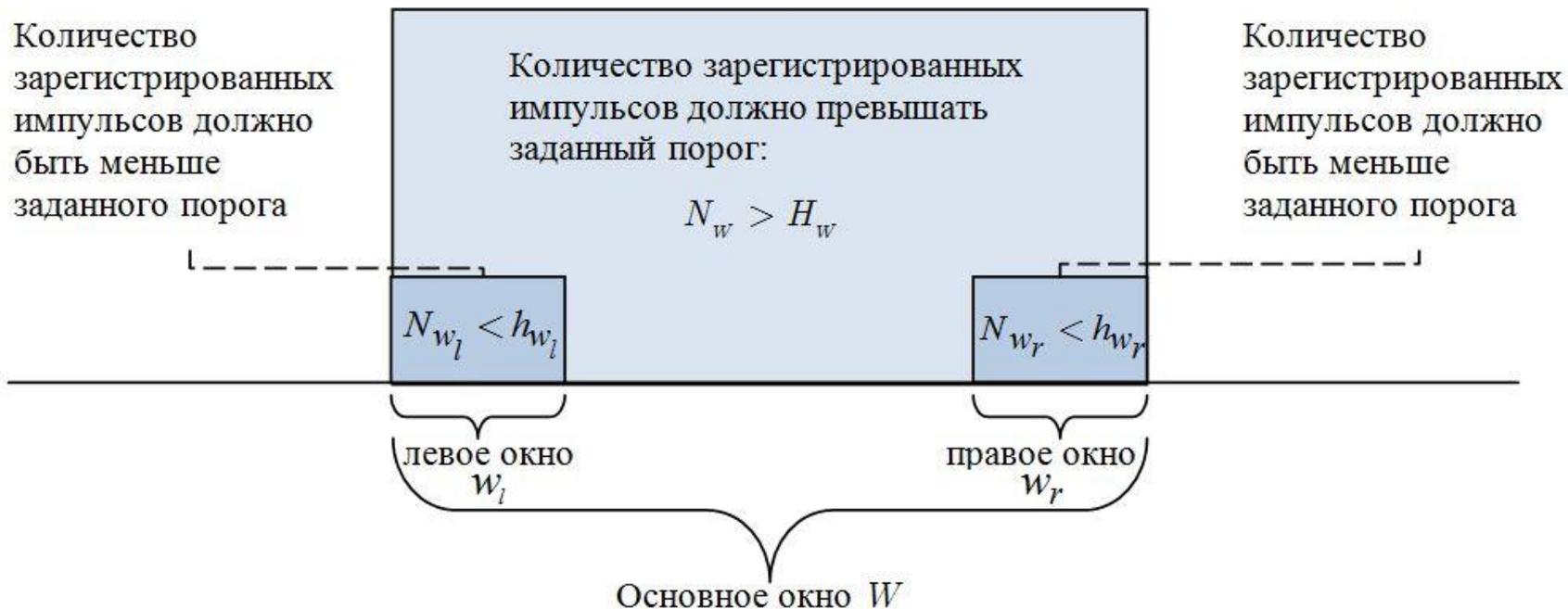
Уточнение координат искомой области в соответствии с принципом пропорциональности

Координата начала искомой области:
$$t_{start} = l_{cur} - l_{prev} \frac{L_{cur}}{L_{prev}}$$

Координата конца искомой области:
$$t_{end} = l_{cur} + \Delta l$$



Трехоконная модель для быстрой примерной локализации зоны болтового соединения



Если сразу несколько подряд идущих окон подходят под заданную модель, из них может быть оставлено одно – среднее



Математическая модель элемента дефектограммы по отдельному каналу

Каждый элемент дефектограммы по отдельному каналу – последовательность импульсов, характеризующихся задержкой и амплитудой:

$$x = \{(\tau_i, a_i) \in R^2, i = 1, \dots, n\}$$

Нулевой элемент (не содержащий импульсов):

$$\emptyset = (0, 0)$$

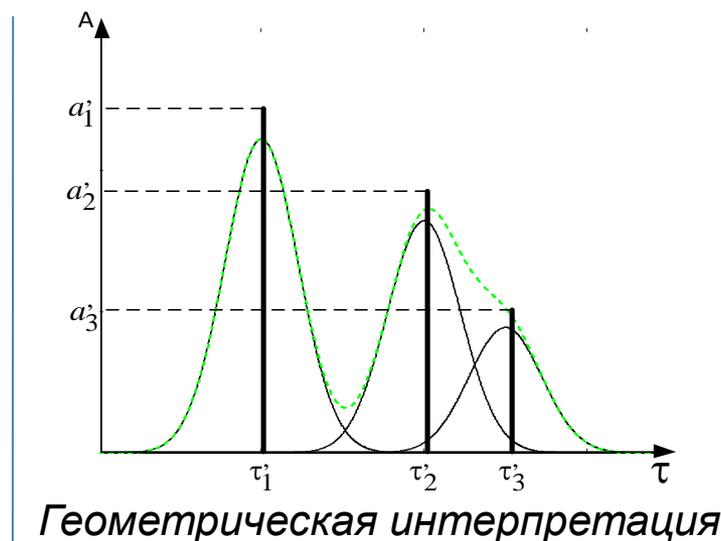
Математическая модель для представления элементов дефектограммы

для элементов, содержащих $n \geq 1$ импульсов:

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

для элементов, не содержащих импульсов:

$$f(\tau | \emptyset) = 0$$



Мера несходства элементов дефектограммы по одному каналу

$x' = \{(\tau'_i, a'_i) \in R^2, i = 1, \dots, n'\}$
 $x'' = \{(\tau''_i, a''_i) \in R^2, i = 1, \dots, n''\}$

- два элемента дефектограммы по одному каналу

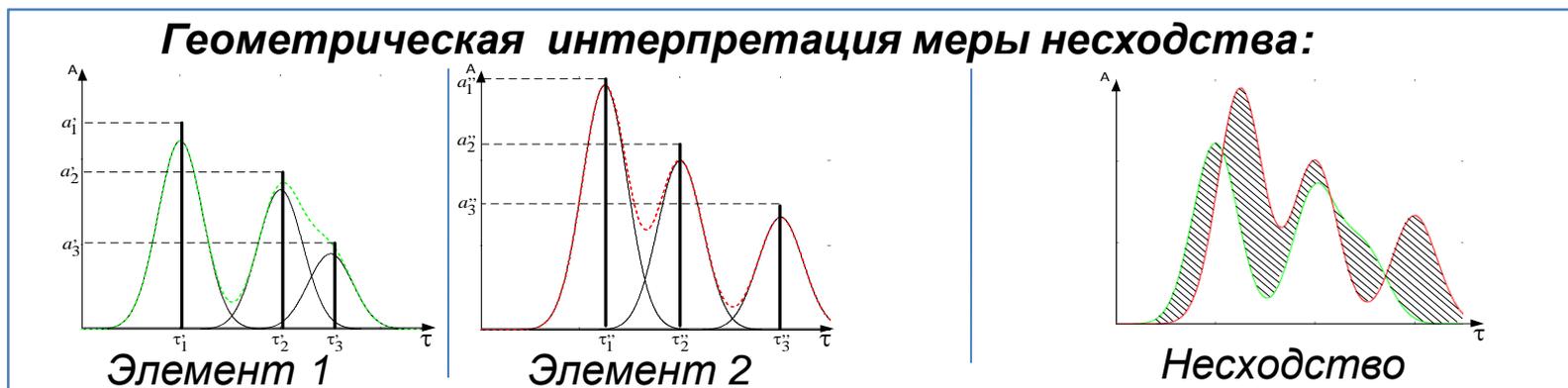
Мера несходства:

$$\tilde{r}(x', x'') = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [f(\tau | x') - f(\tau | x'')]^2 d\tau} \quad (1)$$

Важные достоинства: а) адекватность прикладной задаче
 б) интеграл (1) может быть вычислен аналитически

Эквивалентная форма записи меры несходства (1):

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



Мера несходства элементов дефектограммы по нескольким каналам

Представление элементов дефектограмм по m каналам:

$$\mathbf{x}' = (x'_1, \dots, x'_m), \quad x'_k = \{(\tau'_{k,i}, a'_{k,i}) \in R^2, i = 1, \dots, n', k = 1, \dots, m\}$$

$$\mathbf{x}'' = (x''_1, \dots, x''_m), \quad x''_k = \{(\tau''_{k,i}, a''_{k,i}) \in R^2, i = 1, \dots, n'', k = 1, \dots, m\}$$

Мера несходства по m каналам:

$$r(\mathbf{x}', \mathbf{x}'') = \sum_{k=1}^m c_k \tilde{r}(x'_k, x''_k), \quad \sum_{k=1}^m c_k = 1, \quad c_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, m$$



Задача оптимального выравнивания двух фрагментов дефектограмм

Дано:

два многокомпонентных сигнала, представляющих дефектограммы:

- «базовый»: $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N_x})$
- «ссылочный»: $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_{N_y})$

мера несходства их элементов: $r(\mathbf{x}, \mathbf{y})$

Требуется:

найти оптимальные парные соответствия между элементами дефектограмм:

$$\hat{T} = (\hat{\theta}_t, t = 1, \dots, N_x), \quad \hat{\theta}_t \in \{1, \dots, N_y\} \quad \hat{T} = \arg \min_T J(X, Y, T)$$



Виды выравниваний

Глобальное выравнивание

Обязательное сопоставление всех элементов выравниваемых сигналов.

Применим для сравнения близких по длине сигналов

Пример:

распознавание вида дефекта



Виды выравниваний

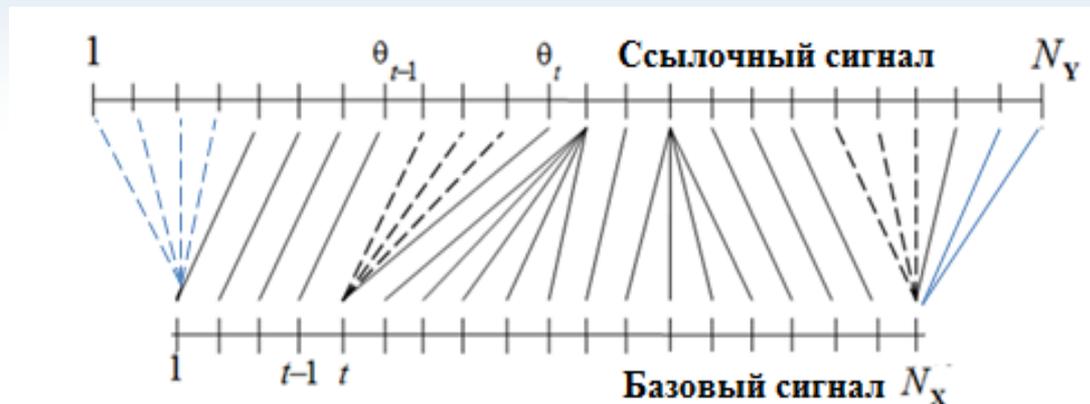
Глобальное выравнивание

Обязательное сопоставление всех элементов выравниваемых сигналов.

Применим для сравнения близких по длине сигналов

Пример:

распознавание вида дефекта

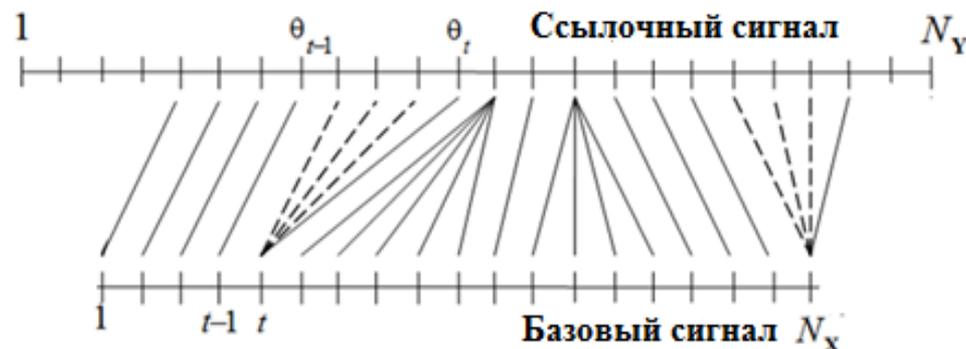


Локально-глобальное выравнивание

Разрешает оставить несвязанными произвольное число крайних элементов ссылочного сигнала

Применим для поиска небольшого фрагмента сигнала в длинном

Пример: поиск зоны болтового соединения на дефектограмме



Критерий локально-глобального выравнивания двух фрагментов дефектограмм

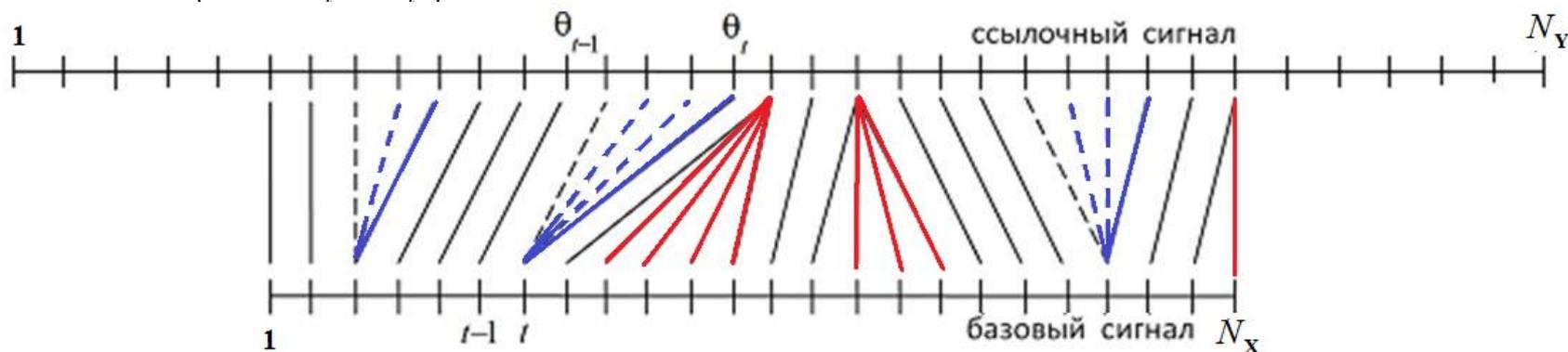
Таблица парных соответствий:

$$\hat{T} = (\hat{\theta}_t, t = 1, \dots, N_X), \quad \hat{\theta}_t \in \{1, \dots, N_Y\} \quad \hat{T} = \arg \min_T J(X, Y, T)$$

$$J(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, T) = r(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_{\theta_1}) + \sum_{t=2}^{N_X} \gamma(\theta_{t-1}, \theta_t),$$

$$\gamma(\theta_{t-1}, \theta_t) = \begin{cases} \beta + r(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_{\theta_t}), & \theta_t = \theta_{t-1}, \\ \beta |\theta_t - \theta_{t-1} - 1| + \sum_{j=\theta_{t-1}+1}^{\theta_t} r(\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_j), & \theta_t > \theta_{t-1}, \\ \infty, & \theta_t < \theta_{t-1}, \end{cases}$$

$\beta > 0$ - штраф на непараллельные ссылки



Метод динамического программирования для локально-глобального выравнивания

Прямой ход - вычисление оптимального значения критерия

$t = 1$:

$$\tilde{J}_1(\theta_1) = J(\theta_1), \quad \theta_1 \in \{1, \dots, N_Y\}$$

$t = 2, \dots, N_X$:

$$\tilde{J}_t(\theta_t) = \min_{\tau \in \{1, \dots, \theta_t\}} [\gamma(\tau, \theta_t) + \tilde{J}_{t-1}(\tau)], \quad \theta_t \in \{1, \dots, N_Y\}.$$

запоминаются обратные рекуррентные соотношения:

$t = 2, \dots, N_X$:

$$\hat{\theta}_{t-1}(\theta_t) = \arg \min_{\tau \in \{1, \dots, \theta_t\}} [\gamma(\tau, \theta_t) + \tilde{J}_{t-1}(\tau)], \quad \theta_t \in \{1, \dots, N_Y\}.$$

Результат: достигнутый минимум критерия: $J(T) = \tilde{J}_{N_X}(\hat{\theta}_{N_X})$

Обратный ход - определение оптимального выравнивания

$$\hat{\theta}_t = \arg \min_{\tau \in \{1 \dots N_Y\}} [\tilde{J}_{N_X}(\tau)], \quad \hat{\theta}_{t-1} = \hat{\theta}_{t-1}(\hat{\theta}_t), \quad t = N_X, \dots, 2$$

Результат: таблица ссылок $\hat{T} = (\hat{\theta}_t, t = 1, \dots, N_X)$,



Поиск локально-глобального выравнивания в виде оптимального пути на графе парных соответствий

Прямой ход - вычисление оптимального значения критерия

$$j = 1, \dots, N_Y : \tilde{J}_{(1,j)} = r(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_j),$$

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

Запоминается направление оптимального перемещения в вершину (i,j) : $h_{i,j} \in \{\downarrow, \searrow, \rightarrow\}$

Оптимальное значение критерия:

$$J(T, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \tilde{J}_{(N_X, \hat{j})} \quad \hat{j} = \arg \min_{j=1, \dots, N_Y} \tilde{J}_{(N_X, j)}$$

Обратный ход - определение оптимального выравнивания (оптимального пути на графе)

$(i = N_X, \hat{\theta}_i = \hat{j})$ - вершина, с которой начинается определение выравнивания

Каждая предыдущая вершина оптимального пути:

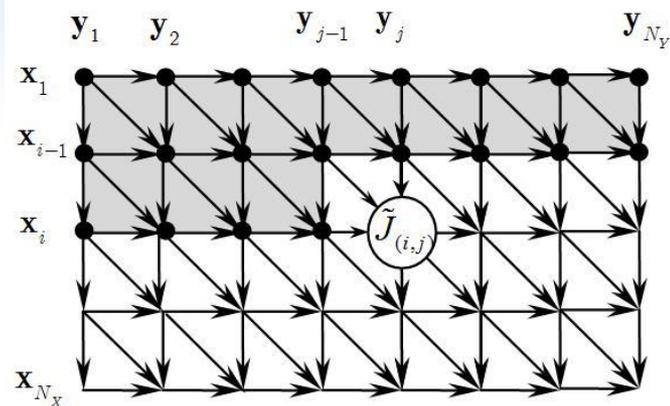
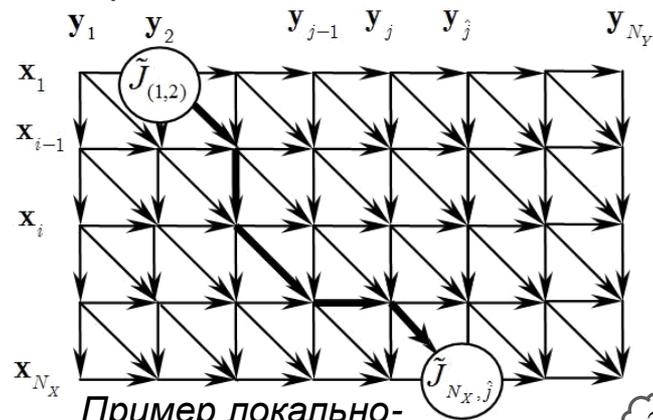
$$\begin{cases} (i-1, \hat{\theta}_i), & \text{если } h_{i, \hat{\theta}_i} = \rightarrow \\ (i-1, \hat{\theta}_i - 1), & \text{если } h_{i, \hat{\theta}_i} = \searrow \\ (i, \hat{\theta}_i - 1), & \text{если } h_{i, \hat{\theta}_i} = \downarrow \end{cases}$$


Иллюстрация алгоритма поиска выравнивания при помощи графа парных соответствий



Пример локально-Глобального выравнивания



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

Данные для выбора параметров: 20 зон болтовых соединений

Выбранные параметры трехконной модели (по 6 ультразвуковому каналу):

- ширина основного окна $W=2000$ точек;
- ширина левого и правого дополнительных окон $w_l = w_r = w = 500$;
- пороговое количество 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 $\Delta W = 50$

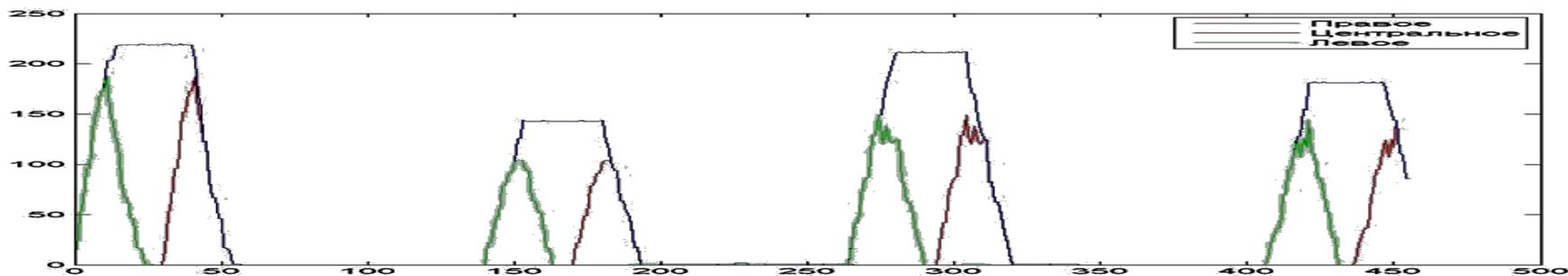


График зависимости количества зарегистрированных импульсов от положения центрального окна для выбранных значений параметров

Данные для проверки: 60 фрагментов дефектограмм, содержащих 120 зон болтовых соединений и 180 участков вне зон болтовых соединений

Результат проверки: все зоны были локализованы верно, единственным окном



Исследование точности определения положения зон болтовых соединений на основе локально-глобального выравнивания

Исходные данные:

- 28 фрагментов дефектограмм (по 2000 отсчетов), содержащих по одной зоне болтового соединения с отмеченным экспертом рельсовым стыком
- 1 фрагмент (1000 отсчетов), содержащий типовую зону болтового соединения

Ошибка определения положения зоны болтового соединения (см) – отклонение положения найденного при помощи выравнивания, от положения, отмеченного экспертом:

канал	min	max	mean	std	median
1	0.2	4.2	1.6929	0.9622	1.7
2	0	29.6	3.9857	7.0077	1.2
3	0	83	10.4143	21.4743	1.3
1+2+3	0	5.2	1.2357	1.3065	0.6

Количество и процент зон болтовых соединений с указанной ошибкой:

канал	отклонение от отметки эксперта			
	0 см	<1 см	<3 см	<6 см
1	0(0%)	8(28.57%)	26(92.86%)	28(100%)
2	2(7.14%)	14(50%)	22(78.57%)	28(100%)
3	1(3.57%)	13(46.43%)	20(71.43%)	22(78.57%)
1+2+3	1(3.57%)	16(57.14%)	26(92.85%)	28(100%)



Исследование точности определения начала и конца искомой области

Ошибка определения начала и конца искомой области (см) относительно области, отмеченной экспертом:

	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	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	1.8	0.8
6	3	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	5.9	6.2
Среднее	3.04±1.5	3.38±1.48	3.49±0.83	3.7±2.1	3.44±0.95	4.1±1.33
Среднее по всем экспериментам 3.53±1.4						



Спасибо за внимание!

