

Matrix time warping

Работа посвящена исследованию метрических методов анализа объектов сложной структуры. Предлагается обобщить метод динамического выравнивания для случая более сложных объектов. Эти объекты определены на двух и более осях времени. В частном, дискретном случае такие объекты представимы в виде матриц. Метод динамического выравнивания временных рядов обобщается как метод динамического выравнивания матриц. Определена функция расстояния, устойчивая к нелинейным деформациям декартового произведения двух и более временных шкал. Определен выравнивающий путь между объектами. В дальнейшем объектом называется матрица, в которой строки и столбцы соответствуют осям времени. Рассмотрены свойства предложенной функции расстояния. Для оценки качества метода на практике проведен вычислительный эксперимент. На модельных данных и данных из датасета MNIST решается задача метрической классификации объектов.

Key words: функция расстояния; динамическое выравнивание; расстояние между матрицами; нелинейные деформации времени; пространственно временные ряды.

1 Введение

Временные ряды представляют собой набор измерений, упорядоченных по оси времени. Анализ временных рядов производится при решении задач, связанных с классификацией активности человека по измерениям акселерометра телефона, поиском характерного паттерна в EEG сигналах, кластеризации набора ECoG данных и во многих других задачах. Рассматриваются объекты, для которых время между измерениями фиксировано. Но точность их измерения существенно варьируется, сторонние случайные факторы оказывают воздействия на поведение физической величины. В таких прикладных задачах исходные данные нелинейно деформированы относительно оси времени: присутствуют глобальные и локальные сдвиги, растяжения и сжатия (ссылка).

Решение задач анализа временных рядов: классификации, детектирования паттернов, кластеризации и других, проводится набором различных методов (ссылка). Выделим основные группы методов,. Первая группа методов (ссылка) основана на анализе коэффициентов различных моделей, с помощью которых описываются временные ряды. Вторая группа (ссылка) основана на анализе их признакового описания (ссылка). Третья группа основана на анализе формы (ссылка). И, наконец, выделяются методы, которые получены при помощи комбинации описанных выше (ссылка).

Задачи кластеризации и поиска оптимальной или фиксированной подпоследовательности в данных не могут быть решены (ссылка) без использования метрических методов анализа временных рядов. Также как и задача классификации при отсутствии выборки достаточного для решения объема. Метрические методы позволяют находить схожие объекты внутри набора таких данных. Предложено множество подходов к определению функции расстояния над временными рядами: расстояние Хаусдорфа (ссылка), MODH (ссылка), расстояние, основанное на НММ (ссылка), Евклидово расстояние в исходном пространстве или в пространстве сниженной размерности (ссылка), LCSS и многие другие. Показано (ссылка), что в случае локальных или глобальных деформаций времени при решении задач, требующих анализа исходной формы временного ряда метод динамического выравнивания оси времени DTW превосходит другие функции расстояния по качеству итогового решения задачи, так как при наличии смещений двух объектов друг относительно друга требуется выравнивать их оптимальным образом, для вычисления расстояния между ними. (ссылка)

В работе предлагается перейти от рассмотрения объекта вида $\mathbf{s}(t)$, задающих временные ряды, к более общему случаю $\mathbf{s}(\mathbf{t})$. Возможно теоретическое обобщение предлагаемых методов на случай конечного множества осей времени, но из-за существенного роста вычислительной сложности, предлагается рассмотреть объекты, определенные на двух осях времени $\mathbf{s}(t_1, t_2)$. В случае дискретной и ограниченной сверху шкалы времени временной ряд представляет собой вектор фиксированной размерности. По аналогии с этим, описанный объект будет представлен матрицей.

Вводятся ограничения на зависимости осей времени в декартовом произведении для таких объектов. Определена гипотеза порождения данных: объекты одного класса эквивалентности получены при помощи допустимых преобразований, а именно локальных деформаций: возможно растяжение и сжатие каждой из осей времени по отдельности. Такое преобразование представляется дублированием строк и столбцов матриц. В число допустимых преобразований попадают и глобальные деформации: сдвиги объектов. Они представляются добавлением и удалением крайних строк и столбцов исходных матриц. Для каждой из осей времени должны выполняться свойства времени: монотонность и непрерывность. Похожими свойствами обладает, например, частотный спектр сигнала, где одна ось определяет время, а другая — частоту, величину, обратную времени.

Между двумя объектами, матрицами, в случае допустимых преобразований требуется определить инвариантную к таким преобразованиям осей времени функцию расстояния, которая сможет выделить классы эквивалентности множества преобразованных объектов. Работа посвящена определению такой функции расстояния как обобщения

метода динамического выравнивания временных рядов DTW для матриц.

Целью данной работы является построение метода, основанного на динамическом выравнивании осей времени для матриц. Метод динамического выравнивания временных рядов определен только для объектов с одной осью времени, что делает его неприменимым для описанного случая. Однако концепции, используемые на каждой стадии вычисления оптимального выравнивания, обобщаются на такой случай. Работа исследует свойства предложенного метода и сравнивает результаты применения метода к задачам классификации изображений с использованием функции расстояния L_2 .

Для получения результатов предложенной моделью решается задача метрической классификации объектов (матриц низкой размерности). Используются два типа данных: модельные данные, которые согласуются с выдвинутой гипотезой порождения данных для временных рядов, а также подмножество датасета MNIST сниженной размерности.

В задачах компьютерного зрения решаются задачи поиска схожих элементов на паре изображений. Для этого используются методы, позволяющие построить локальное описание выделенного пикселя изображения, а затем найти ближайший к нему на другом. (ссылка) Путем применения подобных преобразований ко множеству пикселей изображения получается отношение между пикселями, а далее используется Евклидово расстояние для вычисления функции расстояния между изображениями.

2 Постановка задачи

В работе поставлена задача поиска функции расстояния между объектами сложной структуры. Функция расстояния должна быть инвариантна к допустимым преобразованиям осей времени: глобальным и локальным линейным и нелинейным деформациям временной шкалы. Ниже приведены две постановки задачи, с помощью которых определены свойства предложенной функции расстояния, оценены ее качество и проведены сравнение нескольких функций расстояния.

Первая постановка задачи касается общего свойства функций расстояния: “объединение” схожих объектов и “разделение” непохожих объектов. Вводится определение свойства инвариантности функции расстояния к допустимым преобразованиям осей времени. Вторая постановка задачи уточняет первую и заключается в проведении метрической классификации методом ближайшего соседа.

Постановка задачи выбора функции расстояния между двумя объектами:

На двух временных осях заданы объекты вида $\mathbf{A}(t_1, t_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Функция $G_w(\mathbf{A})$:

$\mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}^{\hat{n} \times \hat{n}}$ задает все допустимые преобразования исходного объекта \mathbf{A} : глобальные сдвиги, локальные линейные и нелинейные деформации. Параметр $w \in \mathbb{R}$ функции G фиксирует вид этих преобразований.

Определение: Допустимым элементарным преобразованием матрицы \mathbf{A} примем: дублирование случайных строк и столбцов исходной матрицы, добавление или удаление крайних строк и столбцов.

Определение: Допустимым преобразованием матрицы \mathbf{A} примем случайную последовательность допустимых элементарных преобразований матрицы \mathbf{A} и обозначим как $G_w(\mathbf{A})$.

Объект $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$ получен из объекта \mathbf{A} при помощи допустимых трансформаций $G_{\hat{w}}$, если существует $\hat{w} : \mathbf{B} = G_{\hat{w}}(\mathbf{A})$.

Критерий качества функции расстояния между двумя объектами $\rho : \mathbb{R}^{\hat{n}_1 \times \hat{n}_2} \times \mathbb{R}^{\hat{n}_3 \times \hat{n}_4} \rightarrow \mathbb{R}^+$ оценим на выборке $\mathfrak{D} = \{\mathbf{A}_i\}_{i=1}^m$ объектов вида $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

Заданы допустимые трансформации двух объектов $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathfrak{D}$, с параметрами w_1 и w_2 , такие, что $G_{w_1}(\mathbf{A}) = G_{w_2}(\mathbf{B})$. Задано множество объектов $\{\mathbf{C}_i\}$, для которых не существует таких $w_i, w : G_w(\mathbf{A}) = G_{w_i}(\mathbf{C}_i)$.

В данной работе решается задача выбора функции расстояния ρ , значение которой между \mathbf{A} и \mathbf{B} меньше, чем между объектом \mathbf{A} и любым объектом \mathbf{C}_i : $\forall i \quad \rho(\mathbf{A}, \mathbf{B}) < \rho(\mathbf{A}, \mathbf{C}_i)$.

Критерием качества для функции расстояния ρ на выборке \mathfrak{D} примем долю объектов, для которых указанное неравенство выполняется:

$$S_\rho(\mathfrak{D}) = \frac{1}{m} \sum_i \prod_{\{\mathbf{B}_j\}_i} \prod_{\{\mathbf{C}_k\}_i} [\rho(\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_j) < \rho(\mathbf{A}_i, \mathbf{C}_k)], \text{ где}$$

$\{\mathbf{B}_j\}_i = \{\mathbf{B} \in \mathfrak{D} | \exists w_1, w_2 : G_{w_1}(\mathbf{A}_i) = G_{w_2}(\mathbf{B})\}$, один класс эквивалентности с \mathbf{A}_i

$\{\mathbf{C}_k\}_i = \{\mathbf{C} \in \mathfrak{D} | \nexists w_1, w_2 : G_{w_1}(\mathbf{A}_i) = G_{w_2}(\mathbf{C})\}$, разные классы эквивалентности с \mathbf{A}_i

Постановка задачи выбора функции расстояния ρ сводится к задаче максимизации критерия качества:

$$\rho = \underset{\rho}{\operatorname{argmax}} S_\rho(\mathfrak{D}).$$

Прикладное использование функции расстояния:

Задана выборка $\mathfrak{D} = \{(\mathbf{A}_i, y_i)\}_{i=1}^m$, состоящая из пар объект — ответ. Объектами служат объекты сложной структуры: $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, а ответами являются метки класса — $y_i \in Y = \{1, \dots, E\}$, где $E \ll m$. Выборка разделена на обучение $\mathfrak{D}_l = \{(\mathbf{A}_i, y_i)\}_{i=1}^{m_1}$ и контроль $\mathfrak{D}_{m_1}^{m_1+m_2}$.

Пусть модель классификации f принадлежит множеству моделей метрической классификации 1NN, которые классифицируемому объекту ставят в соответствие метку класса ближайшего объекта из обучающей выборки по заданной функции расстояния ρ :

$$\hat{y} = f(\mathbf{B}|\rho) = y_{\underset{i=1, \dots, m_1}{\operatorname{argmin}} \rho(B, A_i)}$$

Функция ошибки S модели f для задачи классификации — доля ошибок на контрольной выборке:

$$S(f|\rho) = \frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_1} [f(\mathbf{A}_i|\rho) \neq y_i].$$

Требуется выбрать функцию расстояния ρ для модели классификации $f : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow Y$, минимизирующую функцию ошибки S на контрольной выборке:

$$f = \underset{\rho}{\operatorname{argmin}} (S(f|\rho)). \quad (1)$$

3 MatrixDTW определение

В качестве оптимальной функции расстояния в случае допустимых трансформаций над объектами указанной структуры предлагается использовать функцию расстояния Dynamic Time Warping, модифицированную для случая выравнивания двойной шкалы времени. Ниже приведены необходимые определения и мотивация сравнения со случаем одной шкалы времени.

Определение 1: Даны два объекта \mathbf{A} и \mathbf{B} указанной структуры. Будем считать, что $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Пусть $\mathbf{\Omega}^{n \times n \times n \times n}$ — это тензор, такой что его элемент Ω_{ijkl} равен квадрату разности между (i, j) -ым и (k, l) -ым элементами \mathbf{A} и \mathbf{B} :

$$\Omega_{ijkl} = (\mathbf{A}(i, j) - \mathbf{B}(k, l))^2.$$

Определение 2: Путем π между двумя объектами указанной структуры \mathbf{A} и \mathbf{B} назовем множество пар индексов элементов тензора $\mathbf{\Omega}$:

$$\pi = \{\pi\} = \{((i, j), (k, l))\}, \quad r = 1, \dots, R, \quad i, j, k, l \in \{1, \dots, n\},$$

где R — длина пути, зависящая от выбора пути. Он должен удовлетворять следующим условиям:

Частичный порядок. Для элементов пути π с фиксированными значениями i, k , если такие содержатся в этом пути, можно задать порядок: $\{((i, j_r), (k, l_r))\}_{r=1}^{\tilde{R}}$, где \tilde{R} — число таких элементов.

Граничные условия. Пусть $((i, j), (k, l)) \in \pi$, тогда для этих i, j, k, l выполняется: $((1, j), (1, l)) \in \pi$ и $((i, 1), (k, 1)) \in \pi$. Также путь π содержит в противоположные углы тензора Ω : $((1, 1), (1, 1)) \in \pi$ и $((n, n), (n, n)) \in \pi$.

Непрерывность по направлению. Для упорядоченных элементов пути π с фиксированными значениями i, k : $\{((i, j_r), (k, l_r))\}_{r=1}^{\tilde{R}}$, выполняется условие непрерывности: $((i, j_r), (k, l_r)) = (p_1, p_2)$ и $((i, j_{r-1}), (k, l_{r-1})) = (q_1, q_2)$, $r = 2, \dots, \tilde{R}$, тогда

$$p_1 - q_1 \leq 1, \quad p_2 - q_2 \leq 1.$$

Это ограничение нужно, чтобы в шаге пути π по фиксированному направлению времени участвовали только соседние элементы матрицы (включая соседние по диагонали).

Монотонность по направлению. Для упорядоченных элементов пути π с фиксированными значениями i, k : $\{((i, j_r), (k, l_r))\}_{r=1}^{\tilde{R}}$, выполняется условие непрерывности: $((i, j_r), (k, l_r)) = (p_1, p_2)$ и $((i, j_{r-1}), (k, l_{r-1})) = (q_1, q_2)$, $r = 2, \dots, \tilde{R}$. Тогда выполняется хотя бы одно из условий

$$p_1 - q_1 \geq 1, \quad p_2 - q_2 \geq 1.$$

Это ограничение обусловлено природой рассматриваемых последовательностей и предназначено для монотонности функции выравнивания времени.

Определение 3. Стоимостью $Cost(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi)$ пути π между объектами \mathbf{A} и \mathbf{B} назовем

$$Cost(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi) = \sum_{((i,j),(k,l)) \in \pi} \Omega_{ijkl}. \quad (2)$$

Определение 4. Путем наименьшей стоимости (выравнивающим путем) $\hat{\pi}$ между объектами \mathbf{A} и \mathbf{B} назовем путь, имеющий наименьшую стоимость среди всех возможных путей между объектами \mathbf{A} и \mathbf{B} :

$$\hat{\pi} = \underset{\pi}{\operatorname{argmin}} Cost(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi). \quad (3)$$

Определение 5. Функцию расстояния $MatrixDTW(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ между объектами \mathbf{A} и \mathbf{B} зададим как стоимость выравнивающего пути $\hat{\pi}$:

$$MatrixDTW(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = Cost(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \hat{\pi}). \quad (4)$$

Мотивация метода

В случае выравнивания одной временной шкалы итоговая матрица в каждой ячейке i, j содержит расстояние между под-рядом временного ряда и под-рядом временного ряда.

Рассмотрим классический алгоритм динамического выравнивания двух временных рядов $\mathbf{s} \in R^n$ и $\mathbf{c} \in R^m$:

```
D(1 : n + 1, 1 : m + 1) = inf;
D(1, 1) = 0;
for i = 2 : n + 1
    for j = 2 : m + 1
        cost = (s(i - 1) - c(j - 1))^2;
        D(i, j) = cost + min([D(i - 1, j), D(i, j - 1), D(i - 1, j - 1)]);
DTW(s, c) = sqrt(D(n + 1, m + 1)).
```

Элемент $D(i, j)$ матрицы D соответствует стоимости выравнивающего пути между подпоследовательностями исходных временных рядов: $\mathbf{s}(1 : i)$ и $\mathbf{c}(1 : j)$. Алгоритм построения наилучшего выравнивания времени подразумевает, что оптимальное выравнивание таких двух подпоследовательностей может быть получено тремя различными вариантами:

1. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость у выравнивающего пути между $\mathbf{s}(1 : i - 1)$ и $\mathbf{c}(1 : j)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов (i, j) .
2. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость у выравнивающего пути между $\mathbf{s}(1 : i)$ и $\mathbf{c}(1 : j - 1)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов (i, j) .
3. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость у выравнивающего пути между $\mathbf{s}(1 : i - 1)$ и $\mathbf{c}(1 : j - 1)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов (i, j) .

Предлагается перенести эти рассуждения на случай двух временных шкал и выравнивания двух матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} . Тогда элемент $((i, j), (k, l))$ четырехмерного тензора должен соответствовать стоимости выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i, 1 : j)$ и $\mathbf{B}(1 : k, 1 : l)$.

При этом предлагается получать такое оптимальное выравнивание семью различными способами:

1. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i - 1, 1 : j)$ и $\mathbf{B}(1 : k, 1 : l)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i - 1, j), (k, l)) \in \pi \mid j, l - \text{произвольные}, i, k - \text{фиксированные}\}$ с заменой $i - 1$ на i .
2. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i, 1 : j - 1)$ и $\mathbf{B}(1 : k, 1 : l)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i, j - 1), (k, l)) \in \pi \mid i, k - \text{произвольные}, j, l - \text{фиксированные}\}$ с заменой $j - 1$ на j .
3. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i, 1 : j)$ и $\mathbf{B}(1 : k - 1, 1 : l)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i, j), (k - 1, l)) \in \pi \mid j, l - \text{произвольные}, i, k - \text{фиксированные}\}$ с заменой $k - 1$ на k .
4. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i, 1 : j)$ и $\mathbf{B}(1 : k, 1 : l - 1)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i, j), (k, l - 1)) \in \pi \mid i, k - \text{произвольные}, j, l - \text{фиксированные}\}$ с заменой $l - 1$ на l .
5. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i - 1, 1 : j)$ и $\mathbf{B}(1 : k - 1, 1 : l)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i - 1, j), (k - 1, l)) \in \pi \mid j, l - \text{произвольные}, i, k - \text{фиксированные}\}$ с заменой $i - 1$ на i , $k - 1$ на k .
6. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость u выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i, 1 : j - 1)$ и $\mathbf{B}(1 : k, 1 : l - 1)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i, j - 1), (k, l - 1)) \in \pi \mid i, k - \text{произвольные}, j, l - \text{фиксированные}\}$ с заменой $j - 1$ на j , $l - 1$ на l .

7. Минимальная из перечисленных вариантов стоимость у выравнивающего пути между $\mathbf{A}(1 : i - 1, 1 : j - 1)$ и $\mathbf{B}(1 : k - 1, 1 : l - 1)$. Тогда к этому выравнивающему пути добавляется пара индексов $((i, j), (k, l))$, а также дублируются все пары индексов пути $\{((i, j - 1), (k, l - 1)) \in \pi \mid i, k - \text{произвольные}, j, l - \text{фиксированные}\}$ с заменой $j - 1$ на j , $l - 1$ на l и все пары индексов пути $\{((i - 1, j), (k - 1, l)) \in \pi \mid j, l - \text{произвольные}, i, k - \text{фиксированные}\}$ с заменой $i - 1$ на i , $k - 1$ на k .

С учетом указанных вариантов алгоритм вычисления расстояния между объектами примет вид:

$$D(1 : n + 1, 1 : n + 1, 1 : n + 1, 1 : n + 1) = \text{inf};$$

$$D(1, 1, 1, 1) = 0;$$

$$\pi(1, 1, 1, 1) = ((1, 1), (1, 1))$$

$$\text{for } i, j, k, l \in \mathbb{N}^{2:n+1} \times \mathbb{N}^{2:n+1} \times \mathbb{N}^{2:n+1} \times \mathbb{N}^{2:n+1}$$

$$\begin{aligned} \overline{i, j, k, l} = \operatorname{argmin}([D(i - 1, j, k, l), D(i, j - 1, k, l), \\ D(i, j, k - 1, l), D(i, j, k, l - 1), D(i - 1, j, k - 1, l), D(i, j - 1, k, l - 1), \\ D(i - 1, j - 1, k - 1, l - 1)]); \end{aligned}$$

$$\text{if } \overline{i, j, k, l} == i - 1, j, k, l :$$

$$\text{cost} = \sum_{r, f: ((i-1, r), (k, f)) \in \pi(i-1, j, k, l)} (\mathbf{A}(i, r) - \mathbf{B}(k, f))^2;$$

$$\begin{aligned} \pi(i, j, k, l) = \pi(i - 1, j, k, l) \cup \{((i, r), (k, f)) \mid ((i - 1, r), (k, f)) \in \\ \in \pi(i - 1, j, k, l)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \end{aligned}$$

$$D(i, j, k, l) = \text{cost} + D(\overline{i, j, k, l})$$

$$\text{if } \overline{i, j, k, l} == i, j - 1, k, l :$$

$$\text{cost} = \sum_{r, f: ((r, j-1), (f, l)) \in \pi(i, j-1, k, l)} (\mathbf{A}(r, j) - \mathbf{B}(f, l))^2;$$

$$\begin{aligned} \pi(i, j, k, l) = \pi(i, j - 1, k, l) \cup \{((r, j), (f, l)) \mid ((r, j - 1), (f, l)) \in \\ \in \pi(i, j - 1, k, l)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \end{aligned}$$

$$D(i, j, k, l) = \text{cost} + D(\overline{i, j, k, l})$$

$$\text{if } \overline{i, j, k, l} == i, j, k - 1, l :$$

$$\text{cost} = \sum_{r, f: ((i, r), (k-1, f)) \in \pi(i, j, k-1, l)} (\mathbf{A}(i, r) - \mathbf{B}(k, f))^2;$$

$$\begin{aligned} \pi(i, j, k, l) = \pi(i, j, k - 1, l) \cup \{((i, r), (k, f)) \mid ((i, r), (k - 1, f)) \in \\ \in \pi(i, j, k - 1, l)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \end{aligned}$$

$$D(i, j, k, l) = \text{cost} + D(\overline{i, j, k, l})$$

$$\text{if } \overline{i, j, k, l} == i, j, k, l - 1 :$$

$$\text{cost} = \sum_{r, f: ((r, j), (f, l-1)) \in \pi(i, j, k, l-1)} (\mathbf{A}(r, j) - \mathbf{B}(f, l))^2;$$

$$\begin{aligned} \pi(i, j, k, l) = \pi(i, j, k, l - 1) \cup \{((r, j), (f, l)) \mid ((r, j), (f, l - 1)) \in \\ \in \pi(i, j, k, l - 1)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D(i, j, k, l) &= cost + D(\overline{i, j, k, l}) \\
if \quad \overline{i, j, k, l} &= i - 1, j, k - 1, l : \\
cost &= \sum_{r, f: ((i-1, r), (k-1, f)) \in \pi(i-1, j, k-1, l)} (\mathbf{A}(i, r) - \mathbf{B}(k, f))^2; \\
\pi(i, j, k, l) &= \pi(i - 1, j, k - 1, l) \cup \{((i, r), (k, f)) | \\
&\quad |((i - 1, r), (k - 1, f)) \in \pi(i - 1, j, k - 1, l)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \\
D(i, j, k, l) &= cost + D(\overline{i, j, k, l}) \\
if \quad \overline{i, j, k, l} &= i, j - 1, k, l - 1 : \\
cost &= \sum_{r, f: ((r, j-1), (f, l-1)) \in \pi(i, j-1, k, l-1)} (\mathbf{A}(r, j) - \mathbf{B}(f, l))^2; \\
\pi(i, j, k, l) &= \pi(i, j - 1, k, l - 1) \cup \{((r, j), (f, l)) | \\
&\quad |((r, j - 1), (f, l - 1)) \in \pi(i, j - 1, k, l - 1)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \\
D(i, j, k, l) &= cost + D(\overline{i, j, k, l}) \\
if \quad \overline{i, j, k, l} &= i - 1, j - 1, k - 1, l - 1 : \\
cost &= \sum_{r, f: ((r, j-1), (f, l-1)) \in \pi(i, j-1, k, l-1)} (\mathbf{A}(r, j) - \mathbf{B}(f, l))^2 + \\
&\quad + \sum_{r, f: ((i-1, r), (k-1, f)) \in \pi(i-1, j, k-1, l)} (\mathbf{A}(i, r) - \mathbf{B}(k, f))^2; \\
\pi(i, j, k, l) &= \pi(i, j - 1, k, l - 1) \cup \{((r, j), (f, l)) | \\
&\quad |((r, j - 1), (f, l - 1)) \in \pi(i, j - 1, k, l - 1)\} \cup \{((i, r), (k, f)) | \\
&\quad |((i - 1, r), (k - 1, f)) \in \pi(i - 1, j, k - 1, l)\} \cup \{((i, j), (k, l))\} \\
D(i, j, k, l) &= cost + D(\overline{i, j, k, l}) \\
MatrixDTW(\mathbf{A}, \mathbf{B}) &= \sqrt{D(n + 1, n + 1, n + 1, n + 1)}
\end{aligned}$$

Следует отметить, что алгоритм имеет высокую сложность вычисления — $O(n^4)$. Предполагается ускорение метода при помощи использования аналогичного Sakoe-Chiba band ограничения для случая двух осей времени. Такой подход позволит сократить вычислительную сложность алгоритма до $O(n^2 k^2)$, где k — заранее заданное число.

4 Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент проводился как на модельных данных, порождение которых согласуется с гипотезой порождения данных, так и на реальных данных: коллекция MNIST, к которым применялись различного рода искажения, согласующиеся с гипотезой порождения данных. Эксперимент был проведен и на спектрограммах различных зашумленных сигналов.

В качестве модельных данных использовались матрицы, в которых ненулевыми были: горизонтальная и вертикальная линии, случайный прямоугольник. На модельные данные накладывался шум. К данным применялось случайное число преобразований

времени: как строки, так и столбцы матрицы могли быть продублированы, тем самым создавая новый объект. Такие искажения согласуются с гипотезой о наличии локальных искажений. Также к матрицам могли быть конкатенированы разное число нулевых строк и столбцов, что согласуется с гипотезой о наличии глобальных искажений в данных.

Как было указано в постановке задачи, решается задача метрической классификации методами ближайшего соседа. В таблице ниже приведены значения качества метрической классификации (ссылка) при использовании двух функций расстояния: предложенной в работе (ссылка) и L_2 . Тестирование проведено на различного рода данных: исходных модельных данных без наложения допустимых преобразований, с ними, а также на модельных данных с наложенным поверх объектов случайным шумом.

Данные / Метод	L_2	MatrixDTW
Модельные данные без преобразований	92%	100%
Модельные данные с преобразованиями	86%	100%
Модельные данные с преобразованиями и шумом	69%	92%

Из таблицы видно, что значение функционала качества значительно выше при использовании предложенной функции расстояния. На Рисунке 1 демонстрируется оптимальное выравнивание двух объектов выборки друг относительно друга. Оптимальное выравнивание задано выравнивающим путем π между этими объектами. При помощи соединительных линий показаны элементы этого пути, которые ставят в соответствие друг другу элементы каждой из матриц.

Для проведения эксперимента на реальных данных была подготовлена подвыборка данных MNIST, состоящая из 100 объектов двух классов: 0 и 1. К объектам подвыборки были применены описанные выше допустимые преобразования. Решается задача метрической классификации методами ближайшего соседа. В таблице ниже приведены значения качества метрической классификации (ссылка) при использовании двух функций расстояния: предложенной в работе (ссылка) и L_2 . Тестирование проведено на исходных данных MNIST без наложения допустимых преобразований и с ними.

Данные / Метод	L_2	MatrixDTW
MNIST без искажений	95%	95%
MNIST с искажениями	53%	92%

Аналогично случаю модельных данных, значение функционала качества выше при использовании предложенной функции расстояния. На Рисунке 2 показано оптимальное выравнивание объектов различных классов.

Тот же эксперимент был проведен для классификации спектров различных временных рядов. На рисунке 3 показаны примеры сигналов, для которых был составлен Фурье-спектр. Примеры спектров приведены на рисунке 4.

Спектр получен путем применения быстрого преобразования Фурье к исходному сигналу для различных окон с фиксированным размером и сдвигом. Исходные временные ряды обладали свойством периодичности, период выбирался случайным образом. В таблице ниже приведены значения качества метрической классификации (ссылка) при использовании двух функций расстояния: предложенной в работе (ссылка) и L_2 .

Данные / Метод	L_2	MatrixDTW
Спектр сигнала	83%	96%

В каждом из проведенных экспериментов была продемонстрирована устойчивость предложенного подхода к допустимым преобразованиям, а также метод доставлял большее значение функционала качества.

5 Заключение

В работе предложено обобщение классического метода динамического выравнивания временных рядов для случая объектов на двух осях времени. Вычислительный эксперимент позволил проанализировать свойства подхода. Указанные свойства были проверены и подтверждены на реальных и модельных данных. Качество решения задачи метрической классификации высокое, вычислительная сложность метода также высокая, что ограничивает применимость метода на объектах высокой размерности.

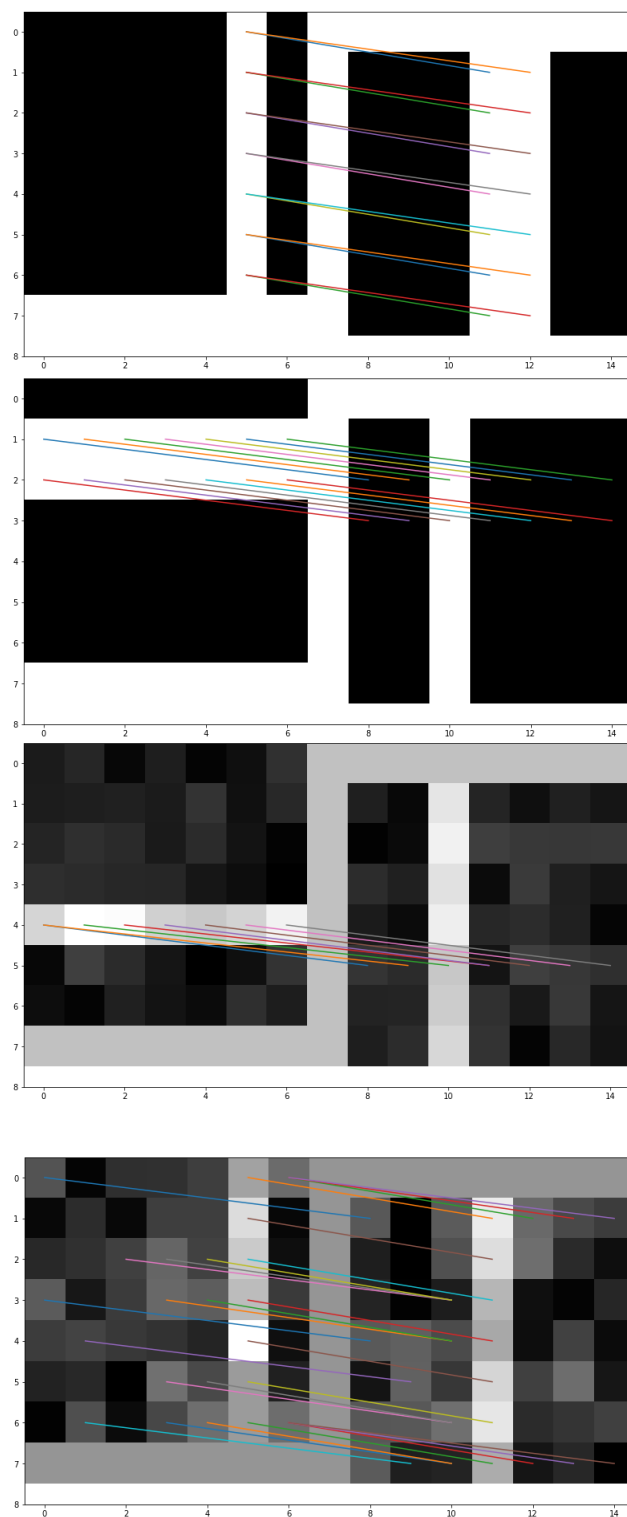


Рис. 1: Визуализация выравнивающего пути для модельных объектов двух классов.

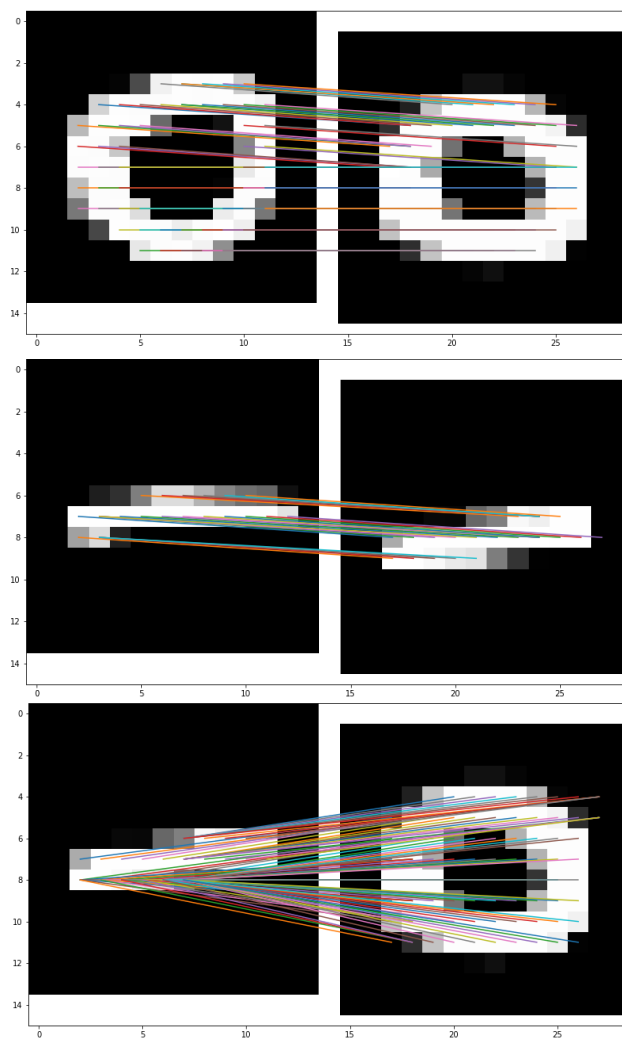


Рис. 2: Визуализация выравнивающего пути для объектов классов 0 и 1.

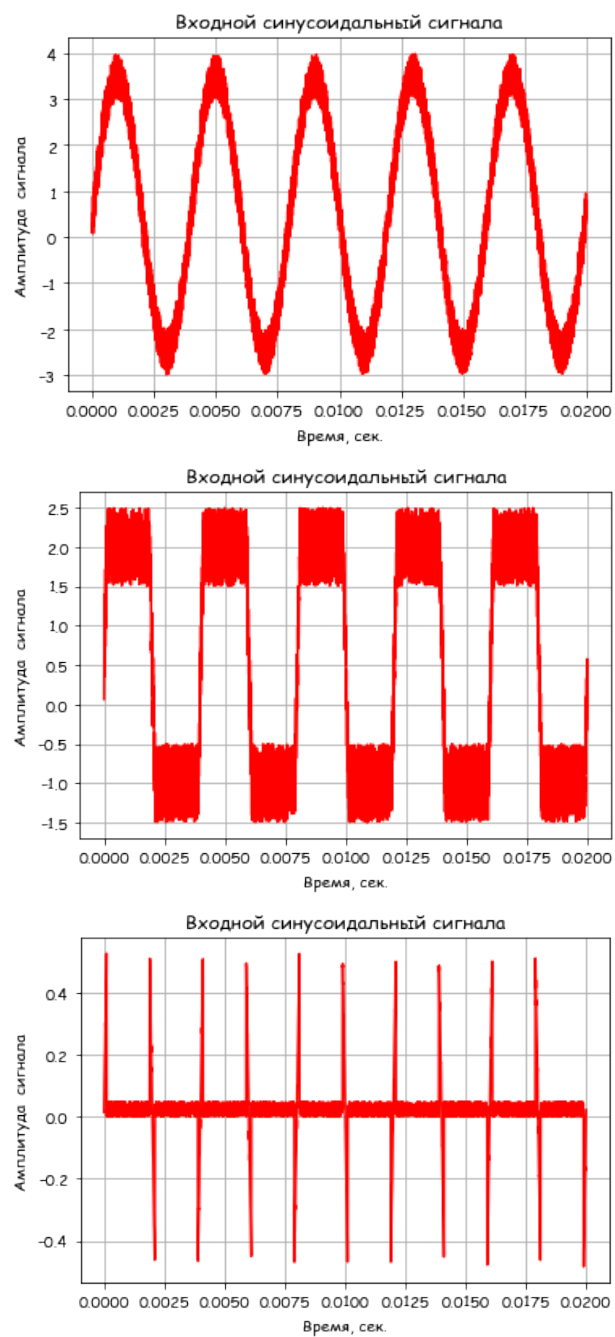


Рис. 3: Визуализация временных рядов для получения спектра сигнала.

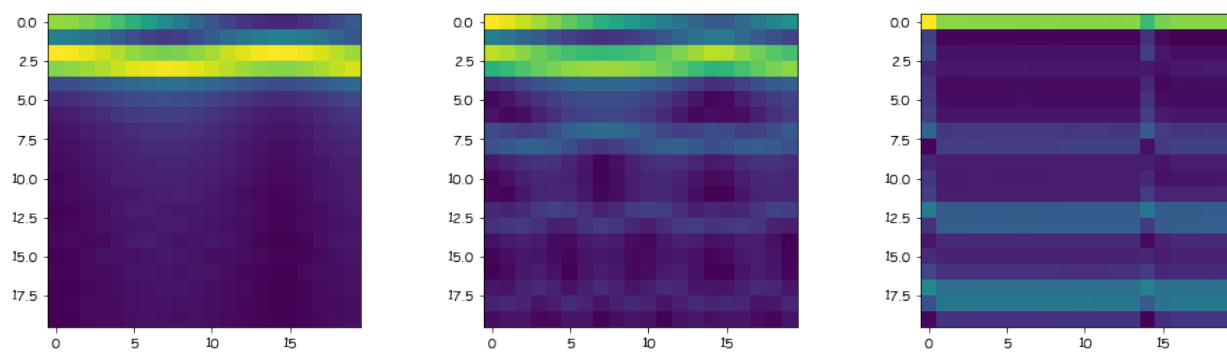


Рис. 4: Визуализация примеров объектов-спектров сигнала.