

УДК 004.93

## СЛЕДУЕТ ЛИ НОРМАЛИЗОВАТЬ ДАННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОДПИСЕЙ ПЕРЕД ВЕРИФИКАЦИЕЙ МЕТОДОМ DTW?



**В.В. Старовойтов**

Главный научный сотрудник ОИПИ  
НАН Беларуси,  
доктор технических наук, профессор  
valerys@newman.bas-net.by

### **В.В. Старовойтов**

Окончил Белорусский государственный университет. Лауреат Государственной Премии Республики Беларусь (2002г.). Область научных интересов связана с анализом цифровых изображений.

**Аннотация.** В статье исследуются динамические подписи, выполненные человеком на планшете. Рассматривается задача нормализации данных на этапе предварительной обработки перед проверкой подлинности цифровой подписи на базе метода динамической трансформации временной шкалы (*dtw*). Приведены результаты экспериментов, выполненных на данных из самой большой общедоступной базы динамических подписей *DeepSignDB*. Впервые экспериментально доказано, что вопреки общепринятой практике расстояния между ненормализованными параметрами подписи и их производными, вычисленные методом *dtw*, позволяют точнее разделять поддельные подлинные подписи чем нормализованные по амплитуде. Это позволяет точнее и объективнее учитывать индивидуальные особенности выполнения динамической подписи конкретным человеком, что особенно важно при выполнении экспертизы при наличии ограниченного числа доступных для сравнения подлинных подписей.

**Ключевые слова:** верификация, динамическая подпись, *dtw*-преобразование, параметрические функции.

**Введение.** Подпись выполняет две функции: удостоверяет личность подписавшего и заверяет подписанный им документ. С точки зрения информационных технологий распознавание подписи относится к биометрическим технологиям, которые различны при анализе подписей, выполненных разными способами: статически (на бумаге) и динамически или онлайн (на планшете). Динамическая подпись содержит данные о динамике исполнения подписи, которые невидимы и делают подпись более уникальной, они точнее характеризуют особенности исполнения подписи конкретным человеком и лучше защищены от подделок. Не стоит путать динамическую подпись с электронной цифровой подписью (ЭЦП), введенной в нашей стране законом республики Беларусь от 28 декабря 2009 г. N 113-3 «Об электронном документе и электронной цифровой подписи». Основным элементом ЭЦП является криптографический ключ. Этот тип подписи используют в основном юридические лица. С 3 марта 1918г. постановлением Правления Национального банка Республики Беларусь [1] разрешена к использованию цифровая рукописная подпись. Это и есть динамическая подпись. Согласно постановлению, цифровая рукописная подпись – это собственноручная подпись клиента, учиненная с помощью соответствующих программных средств (в том числе планшетов) для подтверждения целостности и подлинности подписываемого документа в электронном виде. Официальных методик исследования экспертами подлинности таких

подписей в Республике Беларусь до настоящего времени нет, а в России отсутствует даже официально принятое понятие цифровой рукописной подписи.

Как указано в работе [2] «система признаков, используемых на данный момент экспертами-почерковедами, была разработана еще в советское время, и на сегодняшний день не особо претерпела существенных изменений». В работе [3] отмечено, что «методические основы отечественной почерковедческой экспертизы заложены в 60-70-х годах прошлого столетия». «В настоящее время общая методика проведения почерковедческого исследования особых изменений не претерпела». «Используя одну и ту же методику проведения идентификационной почерковедческой экспертизы, разные эксперты могут по-разному оценить выявленные совпадения и различия. В результате по одному и тому же исследуемому объекту могут быть сделаны совершенно противоположные (иногда категоричные) выводы. Во многом это связано с тем, что используемые идентификационные признаки в большинстве своем носят качественный, оценочный характер и формируются на основе субъективной оценки эксперта».

Эксперты-юристы все еще используют визуальный анализ графического представления цифровых подписей. Приведенные факты свидетельствуют об актуальности разработки интеллектуальных систем проверки подлинности динамических подписей для повышения объективности анализа, выполняемого экспертом. Во многих странах ведутся активные исследования направленные на поиск решения задачи верификации (проверки подлинности) динамической подписи [4].

**Представление динамических подписей.** Подпись, зарегистрированная на планшете с помощью специального стилуса, представляют собой несколько дискретных параметрических функций. Обязательными из них являются: координаты  $X$  и  $Y$  положения стилуса, время фиксации этих координат  $T$  и давление стилуса на поверхность планшета  $P$  в каждой точке. Точки нахождения кончика стилуса фиксируются через равные промежутки времени. У разных производителей они составляют 5, 10 или 15 мсек. Некоторые типы планшетов дополнительно регистрируют две угловые координаты положения стилуса. Все параметры, обычно, представлены целыми числами в определенной шкале, в текстовом формате. Некоторые производители не сохраняют координаты стилуса, перемещаемого без давления на планшет, а только отмечают нулями места разрывов дискретных функций. На рисунке 1 приведены примеры визуального представления подлинной и поддельной подписей данного типа. При визуализации подписи координаты точек касания стилусом планшета соединяются отрезками прямых и формируется ее привычное представление. Некоторые исследователи дополнительно анализируют «невидимые» траектории стилуса при выполнении подписи (на рисунке 1 они показаны красным цветом).

При анализе подлинности цифровых подписей в экспертной практике чаще используется их представление в виде дискретных параметрических функций  $X$ ,  $Y$ ,  $P$  (рисунок 2). Функции являются параметрическими, поскольку их значения каждой из них зависят только от момента регистрации  $t$ .

**Постановка задачи.** Задачу верификации динамической подписи, ориентированную на практическое применение можно сформулировать следующим образом. Дано  $N$  подлинных динамических подписей некоторого человека и одна подпись, подлежащая проверке. Требуется разработать метод формирования объективной оценки сходства верифицируемой подписи с подлинными. Для этого необходимо оценить влияние нормализации сравниваемых данных на результаты верификации подписей человека.

Авторы статьи [5] выполнили исследования по анализу зависимости результатов  $dtw$ -преобразований от пространственной нормализации данных (приведения функций к фиксированному числу значений), примененных к данным из 4-х разных баз данных. Они доказали, что двусторонний тест с уровнем значимости 0,05 между парами

параметрических функций переменной длины и равной длины показывает, что нет статистически значимой разницы между точностью вычисления *dtw*-расстояний.

В работе [6] сравнивались четыре различных типа нормализации данных динамических подписей: 1) отсутствие нормализации; 2) нормализация по времени; 3) масштабирование амплитуды давления  $P$  до диапазона  $[0; 1]$ ; и 4) нормализация по времени с последующей нормализацией давления  $P$ . Нормализация была применена до выполнения *DTW*. Авторы выделили 15 лучших вариантов нормализованных признаков с наименьшими ошибками верификации *EER*. Почти все из 15 вариантов связаны со скоростью.

### **Основные подходы к решению задачи верификации динамических подписей.**

Основные методы верификации подписей, разрабатываемые специалистами в области ИИ, описаны в ряде обзоров. Последний из них представлен в статье [4]. Подходы на базе ИИ используют метод ближайшего соседа, скрытые марковские модели, машины опорных векторов, нейросетевые методы, нечеткие классификаторы и другие. Популярно применение преобразования называемого динамической трансформацией временной шкалы или *DTW*-преобразования. Его разработал Беллман в 1952г. [7]. С 1977г. это преобразование все активнее стало использоваться для сравнения динамических подписей [8].

Недостаток применения *HMM* для анализа динамической подписи заключается в том, что для этого требуется вычисление большого числа признаков, объем данных для обучения модели должен быть очень большим и высока временная сложность [9]. Для обучения искусственных нейронных сетей также требуется большое число образцов подлинных и поддельных подписей. Следует отметить, что на практике у эксперта поддельных динамических подписей не бывает. В лучшем случае он имеет несколько подлинных подписей, определенно выполненных неким человеком и верифицируемую подпись, подлинность которой требуется установить. Указанные ограничения затрудняют разработку классификаторов, указанных типов.

Активно исследуются методы распознавания фальшивых подписей, оценивающих сходство кривых, описываемых параметрическими функциями. Многие из них базируются на оценке расстояния между двумя кривыми. Здесь возможны 2 варианта: вычисление максимального расстояния между совмещенными кривыми (расстояние Фреше [10]) и наименьшее суммарное расстояние необходимое для совмещения двух кривых на базе *dtw*-преобразования. Первый чувствителен к выбросам, т.к. результатом фактически является наибольшее расстояние между всеми возможными парами точек двух кривых.

*Dtw*-преобразование вычисляет интегральные расстояния между двумя дискретными параметрическими функциями  $X$ ,  $Y$ ,  $P$ , либо производными от них функциями. Поэтому оно объективнее оценивает сходство кривых. Многие исследователи используют нормализацию данных при верификации подписей посредством *dtw*. Однако в литературе описаны только сравнительные исследования по нормализации длины указанных функций [5-6], но не амплитуды. В данной работе экспериментально сравнивается возможность разделения множества *dtw*-расстояний, вычисленных между параметрическими кривыми подлинных и поддельных подписей одного человека, что в итоге позволяет определить поддельные подписи.

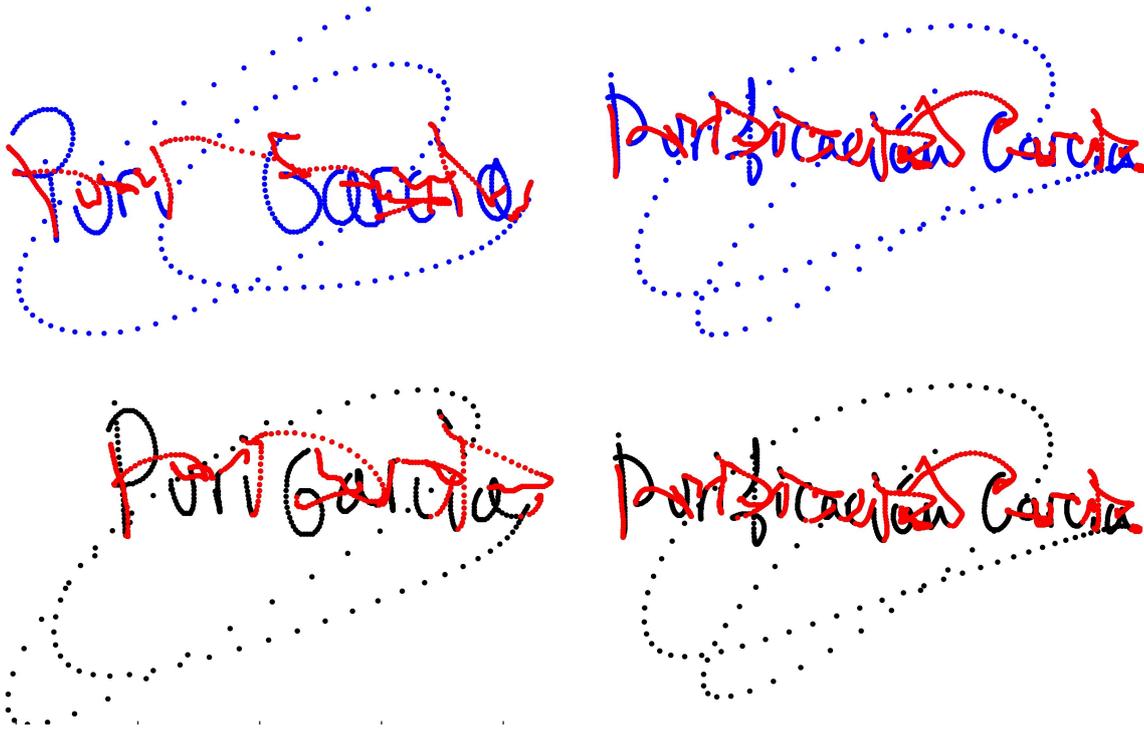


Рисунок 1. В верхней строке представлены фальшивые подписи (левая верхняя – самая сложная для верификации), в нижней – подлинные. Красным цветом показаны точки, в которых стилус был поднят

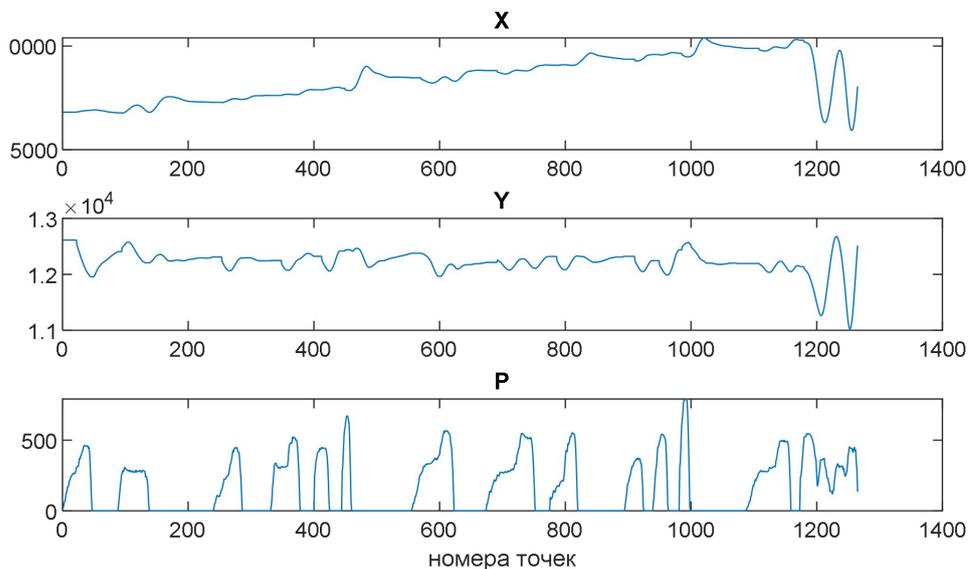


Рисунок 2. Основные данные о динамической подписи в виде дискретных параметрических функций

Полученные результаты могут быть использованы в разработке метода верификации при ограниченном числе подлинных динамических подписей и отсутствии у эксперта поддельных.

**Преобразование DTW.** Кратко опишем идею преобразования *dtw*. Имеются две параметрические функции, представленные наборами чисел разной длины и амплитуды ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ) и ( $b_1, b_2, \dots, b_m$ ). На первом этапе вычисляются локальные расстояния между элементами двух последовательностей, формируется матрица таких расстояний  $d_{ij}$  из  $n$

строк и  $m$  столбцов. На следующем этапе вычисляются минимальные расстояния в матрице между первым элементом с индексами  $i=1, j=1$  и последним элементом с индексами  $i=n, j=m$  при помощи алгоритма динамического программирования и критерия оптимизации:

$$a_{ij} = d_{ij} + \min(a_{i-1,j-1}, a_{i-1,j}, a_{i,j-1}),$$

где  $d_{ij}$  – минимальное расстояние между первым элементом матрицы с индексами 11 и  $ij$ .

Результатом преобразования является кратчайший путь (и его длина) сдвига точек одной последовательности к точкам другой, который можно изобразить набором отрезков на рисунке 3.

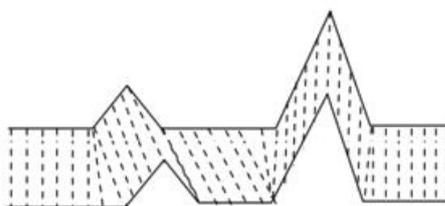


Рисунок 3. Иллюстрация идеи преобразования  $dtw$

Применительно к динамическим подписям это можно проиллюстрировать на рисунке 4. Множества  $y$ -координат двух подписей нормализованы в диапазон  $[0; 1]$  и показаны на верхнем рисунке. На нижнем рисунке показан результат совмещения этих кривых на базе преобразования  $dtw$  и показано расстояние между исходными кривыми. Оно равно 14.60. Чем меньше расстояние, тем больше одна кривая совпадает с другой.

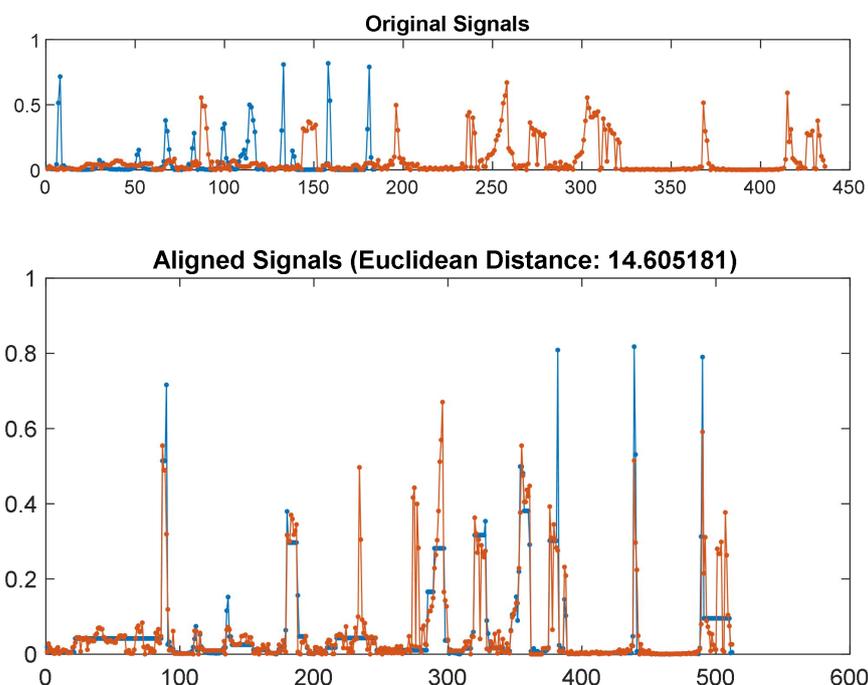


Рисунок 4. Совмещение двух параметрически заданных функций с помощью преобразования  $dtw$

Если кривые имеют разные диапазоны значений, расстояние между ними будет больше, чем между нормализованными и результирующая (после совмещения) дискретная кривая будет иметь больше элементов. На рисунках 5 и 6 представлены пары синусоид с одинаковым сдвигом, но разными амплитудами. Расстояние, вычисленное в результате применения *dtw*, увеличивается в 47 раз и в результате совмещения число точек кривой увеличивается в 1.5 раза, т.е. кривые на рисунке 5 больше похожи друг на друга, чем на рисунке 6. Результат совмещения кривых оказывается длиннее исходных кривых. Этот пример показывает, что для сравнения сходства двух кривых равной длины и одинаковой формы их следует нормализовать к единому диапазону значений. В соответствии с этими рекомендациями в большинстве исследований по верификации динамических подписей выполняют их нормализацию.

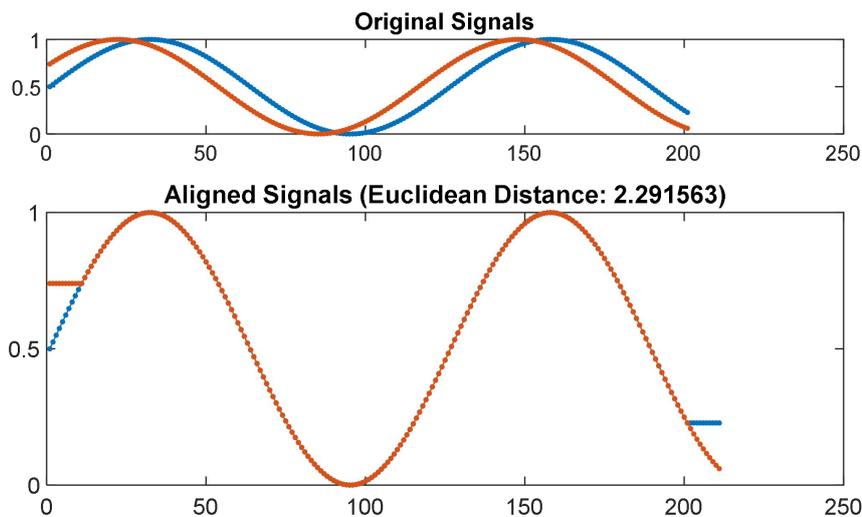


Рисунок 5. Совмещение двух синусоид с одинаковыми амплитудами, но со сдвигом в 0.5 радиана

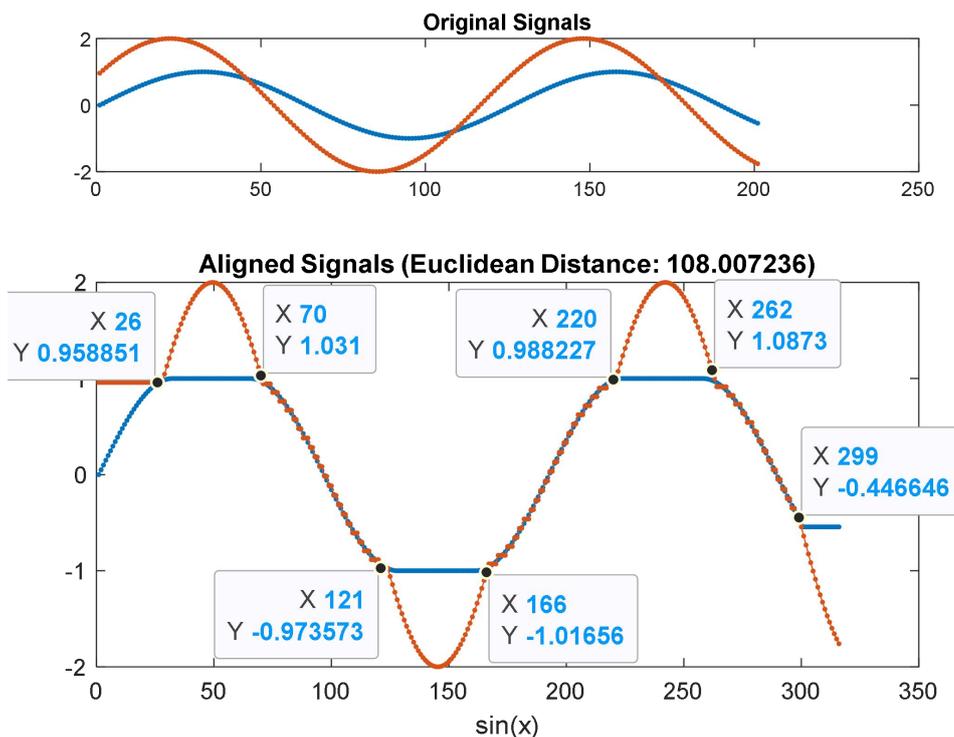


Рисунок 6. Совмещение тех же кривых, но у одной амплитуда в 2 раза выше

**Экспериментальные исследования.** Эксперименты выполнялись на данных самой большой доступной базе динамических подписей *DeepSignDB* [11]. Эта база содержит более 40 000 динамических подписей 1526 человек, собранных из 5 других баз подписей и зарегистрированных на планшетах 8 типов.

При выполнении экспериментов случайным образом выбрано 10 человек. Для каждого случайно выбиралось по 7 подлинных и 7 поддельных подписей. Все подлинные подписи одного человека сравнивались между собой (21 пара для каждого человека), затем оценивалась сходство пар (подлинная-фальшивая) подписей этого же человека из числа выбранных, всего 49 пар для каждого. Сравнение выполнялось посредством совмещения дискретных параметрических кривых, описывающих локальные изменения скорости и ускорения при начертании подписей методом *dtw*, вычисляющим расстояние между парами кривыми. Чем меньше расстояние, тем больше кривые похожи друг на друга. С другой стороны, эти расстояния могут служить признаками, позволяющими разделять множества пар подлинных подписей от множества с поддельными подписями. Возможность порогового разделения важнее абсолютных значений этих признаков.

Исследовалась гипотеза, согласно которой человек выполняет свои подлинные подписи быстрее чем поддельные, вместо другого человека. Предполагалось, что расстояние между точками, фиксируемыми через равные промежутки времени, в подлинных подписях будет больше. Это оказалось верным не во всех случаях. Кроме этого, подпись в основном представляет собой краткую запись, которая обычно выполняется слева направо (за исключением арабских стран и Израиля, но это не принципиально). Основные вариации подписи при написании происходят в вертикальном направлении, а менее значительные в горизонтальном. Зависимости в изменении давления *P* на стилус в подлинных подписях одного человека не замечено. Поэтому исследовались данные, о скорости и ускорении, вычисленные по параметрическим функциям *X* и *Y* каждой подписи.

Сравнение выполнялось посредством оценки изменений скорости и ускорения нанесения подписи в горизонтальном, вертикальном направлении и абсолютных направлениях в плоскости *XU*. Первые производные далее обозначены *dx*, *dy*, *dxu*, вторые – *ddx*, *ddy*, *ddxu*). Они вычислялись через разности значений смежных точек. Для 7 подлинных и 7 поддельных подписей каждого из 10 человека были вычислены расстояния между 21 парой подлинных подписей и 49 парами поддельных с подлинными. Общее число пар составило 700. Для каждой пары вычислялось 10 оценок, указанных в таблице 1.

В таблице 1 представлено количество ошибок при сравнении *dtw*-расстояний между 49 парами подлинных и поддельных подписей относительно максимальных расстояний между 21 парой из подлинных подписей для каждого из 10 человек, т.е. число ошибок при пороговом отделении поддельных подписей посредством изменений скоростей и ускорений в начертании подписей. Жирным шрифтом выделено наименьшее число ошибок по каждому человеку. Используя вычисленные расстояния как признаки пары с поддельной подписью в большинстве случаев можно точнее установить порог индивидуально для каждого человека и каждого параметра. Объединяя разные параметры в признаковое пространство и настраивая на этапе обучения персонально для каждого человека пороги, можно строить индивидуальные деревья решений для верификации динамических подписей конкретного человека.

На представленных ниже рисунках 7-10 показаны соотношения *dtw*-расстояний между парами кривых, представляющих отдельные характеристики сравниваемых подписей. На каждом рисунке представлено 21 значение для подлинных подписей (показаны синими звездочками) и 49 значений расстояний между поддельными и

подлинными подписями (показаны красными кружками). По горизонтали указаны номера пар, по вертикали – расстояния.

На рисунке 7 и 8 показаны оценки для ненормализованного и нормализованного представления данных. Оба варианта позволяют отделить поддельные подписи 330-го человека по одному признаку – вертикальная скорость. Однако, можно заметить изменения соотношений между оценками соседних пар подписей. Это свидетельствует о том, что нормализация данных по амплитуде может повлиять на результат верификации.

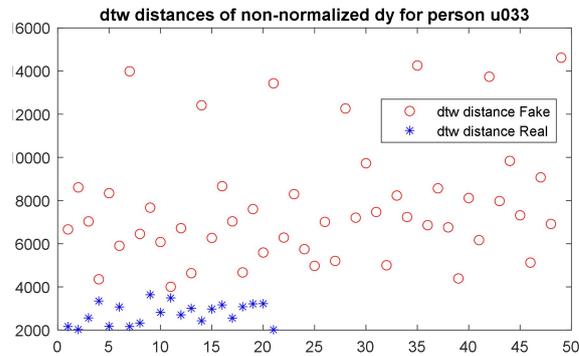


Рисунок 7. Оценки после *dtw*-преобразования 21 пары подлинных подписей и 49 пар поддельных с подлинными. Сравнялись скорости изменения написания подписи человеком № 330 в вертикальной плоскости, Данные не нормализованы

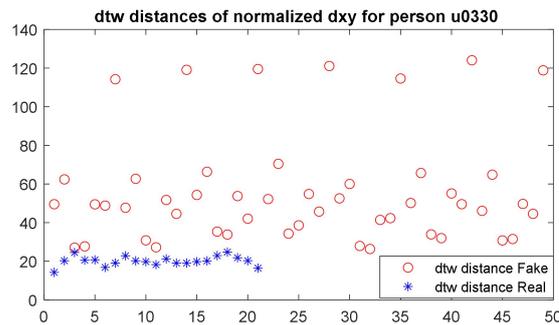


Рисунок 8. Такие же оценки для тех же данных после нормализации

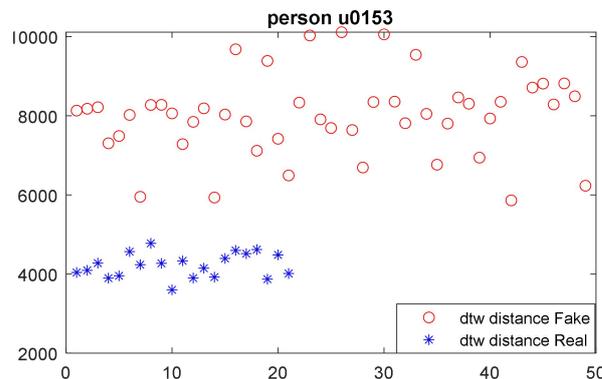


Рисунок 9. Расстояния после *dtw*-преобразования пар ненормализованных подписей человека № 153 позволяют отделить пары с поддельными подписями

Рисунок 9 демонстрирует, что ненормализованные данные позволяют отделить поддельные подписи человека № 153 пороговым методом, а рисунок 10 – что эти же нормализованные данные не позволяют. Этот факт говорит о том, что особенности

нанесения подписи на планшет человеком №153 существенно отличаются от нанесения поддельных подписей другими людьми, а нормализация данных сглаживает различия.

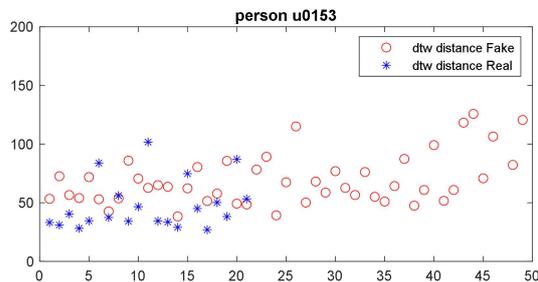


Рисунок 10. После нормализации тех же данных и выполнения *dtw*-преобразований значения расстояний между двумя группами подписей перемешиваются

Таблица 1. Число ошибок при верификации 49 пар подлинных и поддельных подписей относительно максимальных расстояний между парами подлинных

№	человек	Для ненормализованных данных $X, Y$					Для нормализованных данных $X, Y$				
		$dx$	$dy$	$dxy$	$ddy$	$ddxy$	$dx$	$dy$	$dxy$	$ddy$	$ddxy$
1	u0330	1	0	0	0	2	20	3	0	32	15
2	u0336	10	28	11	35	25	44	47	11	45	43
3	U0322	16	0	0	0	1	11	0	2	46	24
4	U0329	0	0	0	12	18	41	46	11	43	34
5	U0222	9	9	13	19	16	40	31	46	43	41
6	U0153	1	0	0	3	15	26	45	31	44	15
7	U0497	7	21	4	4	0	13	15	12	29	10
8	U0250	0	7	3	7	5	1	7	5	9	3
9	U0050	1	3	0	17	6	12	6	2	48	21
10	U0001	2	3	4	4	11	9	43	15	48	16

В результате анализа экспериментальных данных выявлены следующие факты.

1 Согласно расстояниям, вычисленным *dtw*-преобразованиями иногда нормализованные поддельные подписи больше похожи на подлинные подписи человека, чем не нормализованные.

2 Подлинные подписи человека под номером 336, представленные на рисунке 1, сложны для анализа, поскольку они имеют существенно различающий их фрагмент – ряд букв в центре подписи (на некоторых подписях эти буквы отсутствуют). Это приводит к тому, что при сравнении подлинных, но существенно различных подписей оценки их сходства хуже, чем при сравнении некоторых поддельных с отдельными подлинными. При выборе подлинных подписей для выполнения верификации следует избегать таких образцов.

3 При оценке принадлежности подписи конкретному человеку важны не абсолютные значения расстояний, вычисленных методом *dtw*, а возможность разделения подлинных и поддельных подписей.

**Заключение.** В работе на примерах анализа реальных динамических подписей разных людей показано, что при верификации подписей такого типа при использовании метода динамической трансформаций временной шкалы (*DTW*-преобразования) важнее не минимальность абсолютных значений расстояний, вычисленных этим методом, а возможность разделения подлинных и поддельных подписей одного человека, опираясь

на вычисленные значения. Min-max нормализация амплитуды параметрических функций, описывающих данные динамических подписей, может снизить точность объективной верификации таких подписей. При использовании *dtw*-преобразования нормализацию амплитуды данных о динамической подписи выполнять не рекомендуется.

### Список литературы

- [1] Цифровая рукописная подпись как новый способ подтверждения документа в электронном виде вводится в Беларуси. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2018/march/27952/>.
- [2] Ярошук И.А., Гриневич К.В., Проблемные вопросы экспертизы подписи как малообъемного почеркового объекта // Актуальные проблемы российского права.- 2021.- Т. 129.- №.8.- С.141-151.
- [3] Мещеряков В.А., Бутов В.В., Оценка возможностей почерковедческой экспертизы сквозь призму современных информационных технологий. Вестник Воронежского института МВД России. 2017ю- № 2.- С.40-46.
- [4] Kaur H., Kumar M., Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, Vol. 14, No.2, pp.1027-45.
- [5] Ratanamahatana CA, Keogh E. Everything you know about dynamic time warping is wrong. In 3rd workshop on mining temporal and sequential data 2004 Aug 22, Seattle, USA, pp.50-60.
- [6] Fenton, D., Bouchard, M., & Yeap, T. H. (n.d.). Evaluation of Features and Normalization Techniques for Signature Verification Using Dynamic Timewarping. 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing Proceedings. doi:10.1109/icassp.2006.1660860.
- [7] Bellman R. On the theory of dynamic programming. Proceedings of the national Academy of Sciences. 1952, Vol. 38(8), pp.716-719.
- [8] Yasuara M., Oka M., Signature verification experiment based on non-linear time alignment, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1977, Vol.17, pp. 212-216.
- [9] Chughtai J. R., Khalid S. Online Signature Verification: A Review, Journal Appl. Environ. Biol. Sci., 2014, (9S), pp.303-308.
- [10] Zheng J, Gao X, Zhan E, Huang Z. Algorithm of on-line handwriting signature verification based on discrete Fréchet distance. In 3rd Int. Symposium on Advances in Computation and Intelligence, Wuhan, China, December 19-21, 2008, pp. 461-469.
- [11] DeepSignDB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/BiDALab/DeepSignDB>.

### Авторский вклад

Старовойтов Валерий Васильевич – выполнил все эксперименты и написал статью.

## SHOULD WE NORMALIZE DYNAMIC SIGNATURES DATA BEFORE DTW-BASED VERIFICATION?

*V.V. Starovoitov*

*Chief Researcher UIIP NAS*

*of the Republic of Belarus*

*Doctor of Engineering Sciences, Professor*

**Abstract.** The paper examines dynamic signatures made by a person on a tablet. We consider the problem of data normalization at the preprocessing stage before verifying the authenticity of a digital signature based on the dynamic timeline warping (*dtw*) method. The results of experiments performed on data from the largest public database of dynamic signatures, DeepSignDB, are presented. For the first time, it has been experimentally proven that, contrary to generally accepted practice, the distances between non-normalized signature parameters and their derivatives, calculated by the *dtw* method, make it possible to more accurately separate fake signatures than those normalized by amplitude. This makes it possible to more accurately and objectively take into account the individual characteristics of the execution of a dynamic signature by a specific person, which is especially important when performing an examination when there is a limited number of authentic signatures available for comparison.

**Key words:** verification, on-line signature, *dtw* transformation, parametric functions.