



УДК 004; 004.932
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-2-94-106>

Оригинальная статья
Original Article

Верификация динамической подписи человека по ограниченному числу образцов

В. В. Старовойтов

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
E-mail: valerys@newman.bas-net.by*

Аннотация

Цели. Целью исследования является разработка нового метода оценки подлинности подписи одного человека, выполненной на планшете стилусом, при наличии ограниченного числа образцов подписей этого человека.

Методы. Показано, как строить индивидуальный образ динамических подписей произвольного человека, который описывается точками в многомерном признаковом пространстве и предназначен для последующих проверок подлинности подписей данного человека. Образ строится по $5 < N < 20$ образцам подлинных подписей человека. Он представляет собой выпуклую фигуру в многомерном признаковом пространстве и описывает индивидуальные признаки выполнения подписи конкретным человеком.

Результаты. Динамика исполнения подписи представлена тремя дискретными параметрическими функциями: координатами стилуса X , Y и его давлением на планшет P , зарегистрированными через фиксированные промежутки времени. В процессе исследований отобран ряд вычисляемых по ним вторичных функций-признаков. Поскольку эти массивы данных имеют разную длину, для их сравнения используется алгоритм динамической трансформации временной шкалы. Результатами данного преобразования являются расстояния между динамическими признаками двух подписей, которые служат координатами точки в признаковом пространстве, описывающей сходство этих подписей. Множество таких точек описывает сходство всех пар подлинных подписей человека, предъявленных для верификации, в многомерном признаковом пространстве. Выпуклая оболочка облака этих точек используется как образ подписи конкретного человека. Подлинные подписи любого человека всегда отличаются друг от друга, существенные отличия между ними могут исказить результат верификации.

Заключение. Экспериментальные исследования по формированию индивидуальных образов подписей 498 человек из базы динамических подписей DeepSignDB показали точность верификации порядка 98 % при анализе 24 900 подписей. Из них половина подлинные, половина поддельные.

Ключевые слова: верификация, динамическая подпись, dtw -преобразование, параметрические функции, признаковое пространство

Для цитирования. Старовойтов, В. В. Верификация динамической подписи человека по ограниченному числу образцов / В. В. Старовойтов // Информатика. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 94–106.
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-2-94-106>

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 08.05.2024

Подписана в печать | Accepted 24.05.2024

Опубликована | Published 28.06.2024

Verification of the person's dynamic signature on a limited number of samples

Valery V. Starovoitov

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
E-mail: valerys@newman.bas-net.by*

Abstract

Objectives. The goal of the research is to develop a new person-dependent method for verification of a signature of one person made on a tablet with a stylus in the presence of a limited number of signature samples of this person. **Methods.** The paper shows how to construct an individual pattern of the dynamic signatures of any person, which is described by points in a multidimensional feature space and is intended for subsequent verification of the authenticity of the signatures of a given person. It is constructed using $5 < N < 20$ samples of genuine human signatures. The pattern forms a convex object in a multidimensional feature space. It describes the peculiar properties of a signature performed by a specific person.

Results. The dynamics of signature execution is represented by three discrete parametric functions: coordinates of the stylus X , Y and its pressure on the tablet P , recorded at fixed time intervals. In the process of research, a number of secondary functions-features were selected and calculated from them. Since these data sets have different lengths, the dynamic time warping algorithm is used to compare them. The results of this transformation are distances between the dynamic features of two signatures, which serve as coordinates of a point in the feature space that describes the similarity of these signatures. The set of such points describes similarity of all pairs of genuine human signatures presented for verification in a multidimensional feature space. The convex hull of the cloud of these points is used as a pattern of a particular person's signature. The genuine signatures of any person are always different from each other; significant differences between them can distort the verification result.

Conclusion. Experimental studies performed on genuine and fake signatures of 498 people from the largest available database of dynamic signatures, DeepSignDB, showed a verification accuracy of about 98 % when analyzing 24,900 signatures. Half of them are genuine, half are fake.

Keywords: verification, dynamic signature, *dtw* transformation, parametric functions, feature space

For citation. Starovoitov V. V. *Verification of the person's dynamic signature on a limited number of samples*. Informatika [Informatics], 2024, vol. 21, no. 2, pp. 94–106 (In Russ.).
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-2-94-106>

Conflict of interest. The author declares of no conflict of interest.

Введение. Рукописная подпись удостоверяет личность человека, подписавшего некий документ, либо заверяет подписанный документ. С точки зрения информационных технологий распознавание подписи относится к биометрическим технологиям, которые различаются при анализе подписей, выполненных разными способами: статических (выполненных на бумаге) и динамических, или онлайн (выполненных на планшете). Динамическая подпись может быть представлена изображением, построенным в виде кривых (чем сводится к статической подписи), но она содержит дополнительные данные о динамике исполнения подписи, которые невидимы и делают подпись более уникальной. Динамические характеристики имеют больше степеней свободы и точнее характеризуют особенности исполнения подписи конкретным человеком, поэтому они лучше защищены от подделок.

Следует отличать динамическую подпись от электронной цифровой подписи (ЭЦП), введенной в нашей стране Законом Республики Беларусь от 28 декабря 2009 г. № 113-З «Об электронном документе и электронной цифровой подписи». Основным элементом ЭЦП является криптографический ключ. Этот тип подписи используют в основном юридические лица. С 3 марта 2018 г. постановлением Правления Национального банка Республики Беларусь (URL: <https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2018/march/27952/>) разрешена к использованию цифро-

вая рукописная подпись, она и является динамической, или онлайн, подписью. Согласно указанному 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.

Система признаков, используемых на данный момент экспертами-почерковедами, была разработана еще в советское время и на сегодняшний день не особо претерпела существенных изменений [1]. В статье [2] отмечено, что методические основы отечественной почерковедческой экспертизы заложены в 60–70-х гг. прошлого столетия и что 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» [2]. Эксперты-юристы все еще используют визуальный анализ графического представления цифровых подписей, а он является субъективным.

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 [3]. На сегодняшний день исследуется возможность применения разных методов для разработки систем верификации динамических подписей. Наиболее популярными подходами являются динамическое искажение временной шкалы (Dynamic Time Warping, DTW), скрытая марковская модель (Hidden Markov Models, HMM), искусственные нейронные сети и метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) [3].

1. Представление динамических подписей. Подпись, зарегистрированная на планшете с помощью специального стилуса, представляет 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 мс. Некоторые типы планшетов дополнительно регистрируют две угловые координаты положения стилуса. Все параметры чаще всего 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, т. е. начала и окончания сегментов подписи. На рис. 1 приведены примеры визуального разнообразия подлинных динамических подписей одного человека, при визуализации разные сегменты подписи показаны разным цветом. Справа внизу представлена поддельная подпись этого же человека.

При анализе подлинности цифровых подписей в экспертной практике чаще всего используется их представление в виде графиков дискретных параметрических функций X , Y , P (рис. 2). Некоторые планшеты регистрируют углы наклона стилуса, но в настоящей работе эти данные не применяются. Функции являются параметрическими, поскольку значения каждой из них зависят только от момента регистрации t .

2. Постановка задачи. Задачу верификации динамической подписи, ориентированную на практическое применение, можно сформулировать следующим образом. Даны N ($5 < N < 20$) подлинных динамических подписей некоторого человека и одна подпись, подлежащая проверке. Требуется разработать метод автоматического вычисления объективной оценки сходства верифицируемой подписи для определения ее подлинности. Эта оценка должна помочь эксперту принять более объективное решение при исследовании подлинности динамической подписи.

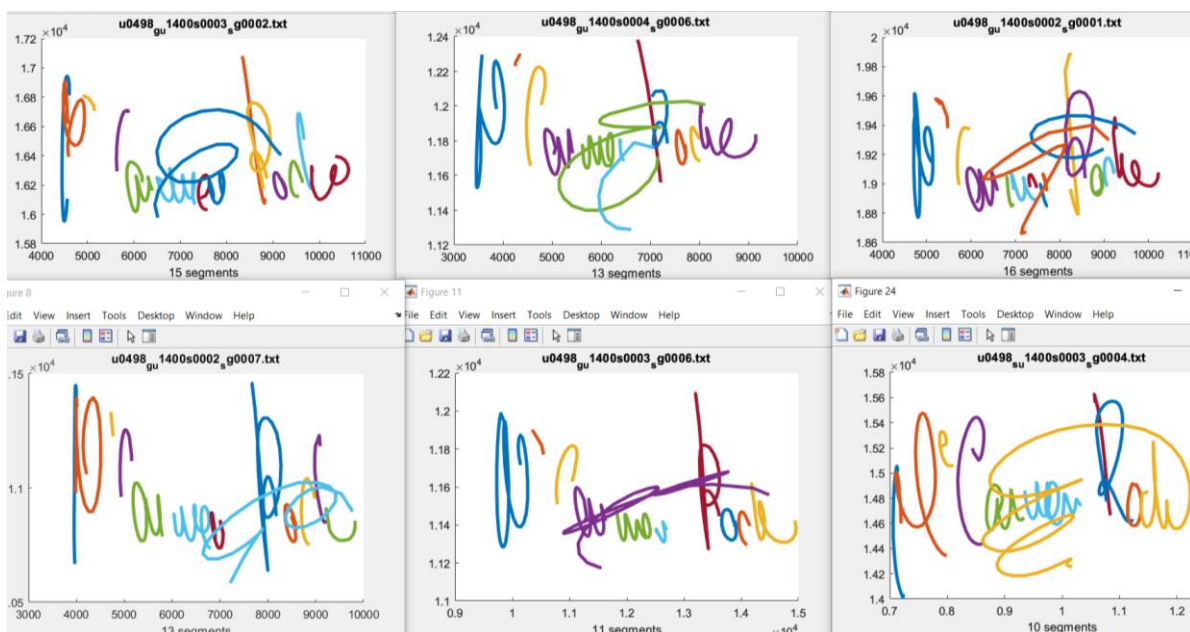


Рис. 1. Визуализация динамических подписей

Fig. 1. Visualization of dynamic signatures

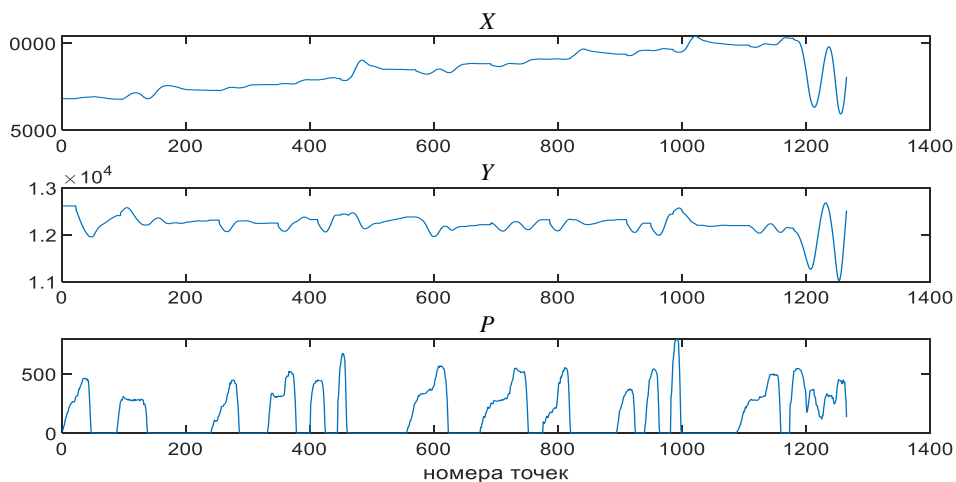


Рис. 2. Основные данные о динамической подписи, представленные в виде дискретных параметрических функций X , Y , P

Fig. 2. Basic data on dynamic signature are presented in the form of discrete parametric functions X , Y , P

Для решения поставленной задачи необходимо построить образ динамической подписи человека, который численно описывает индивидуальные особенности исполнения подписи этим человеком и учитывает вариабельность цифрового представления подписи. Он должен позволять выполнять проверку подлинности других подписей этого человека и выявлять поддельные подписи.

Следует учесть, что все подписи одного человека различаются числом точек, особенно когда они выполняются с разной скоростью и на планшетах разных типов. Кроме того, подписи одного человека неизбежно имеют локальные вариации формы (рис. 3).

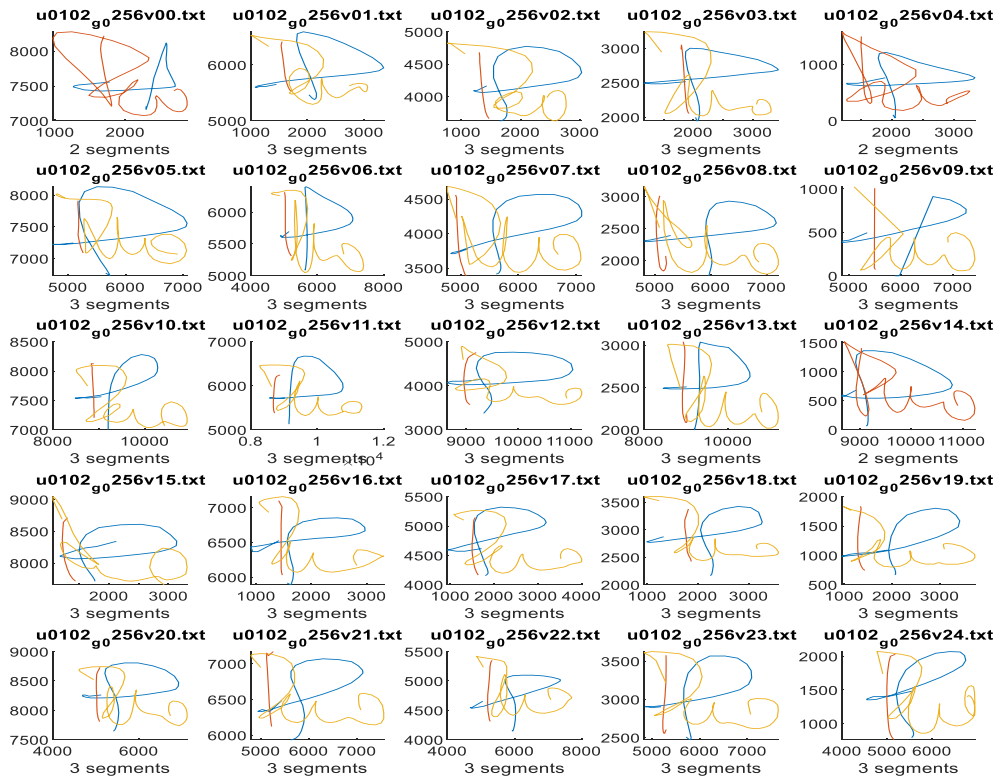


Рис. 3. Подлинные подписи человека с идентификатором U0102 (разным цветом показаны различные сегменты подписей)

Fig. 3. Genuine signatures of a person with ID U0102 (different colors show different segments of the signatures)

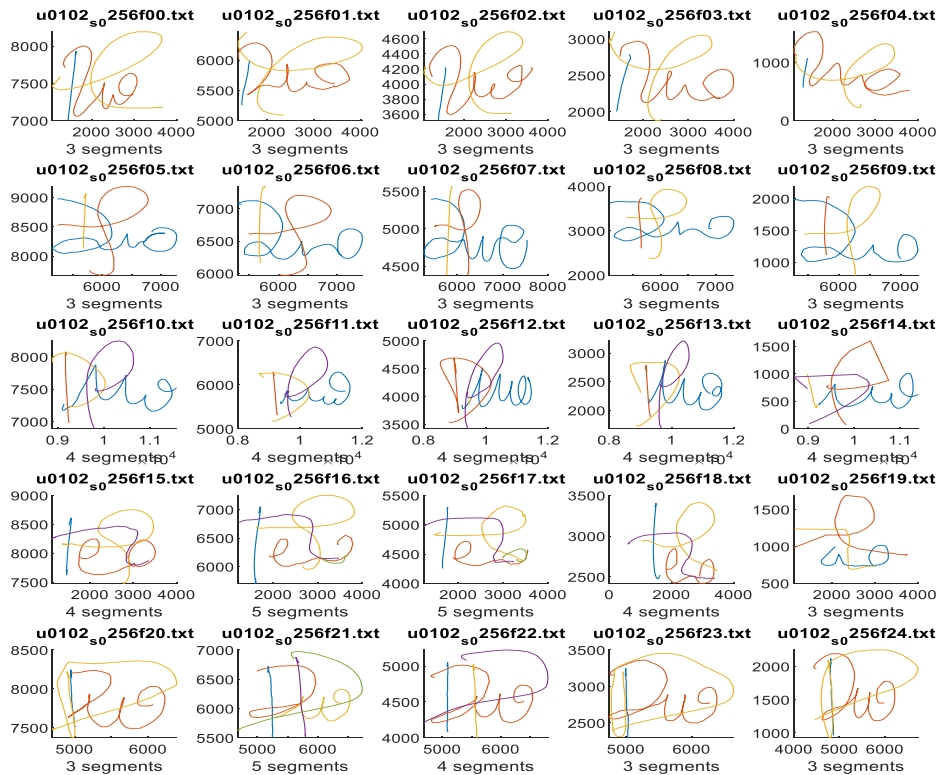


Рис. 4. Фальшивые подписи человека с идентификатором U0102

Fig. 4. Fake signatures of a person with ID U0102

3. Особенности выполнения динамической подписи. Все подписи, сделанные одним человеком даже на одном планшете, всегда имеют разную длину (число точек), геометрические размеры и ориентацию на плоскости XU , несколько отличающиеся форму и динамику исполнения (рис. 3 и 4).

Авторы статьи [4] выполнили исследования по анализу зависимости результатов dtw -преобразований от пространственной нормализации данных (приведения функций к фиксированному числу значений), примененных к данным из четырех разных баз. Они доказали, что двусторонний тест с уровнем значимости 0,05 между парами параметрических функций переменной и равной длины показывает отсутствие статистически значимой разницы между точностью вычисления dtw -расстояний.

В работе [5] сравнивались четыре различных типа нормализации данных динамических подписей: отсутствие нормализации, нормализация по времени, масштабирование амплитуды давления P до диапазона $[0; 1]$ и 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.

Таким образом, динамические подписи хотя и похожи после визуализации на привычные статические подписи, сделанные на бумаге, но в статическом представлении теряется вся информация о динамике исполнения подписи. Между тем динамические признаки существенно увеличивают число степеней свободы, что при малом числе образцов подлинных подписей усложняет задачу верификации, а собирать и хранить их в большом количестве проблематично.

В настоящей статье основными признаками динамической подписи считаются те, которые вычисляются локально, по соседним отсчетам функций X , Y и P . В работе были использованы избранные признаки, описанные в статьях [6, 7] (табл. 1).

Таблица 1
 Динамические признаки подписи
 Table 1
 Dynamic signature features

Функция <i>Function</i>	Формула <i>Formula</i>
Горизонтальная скорость, dx	$dx_i = x_{i+1} - x_i$
Вертикальная скорость, dy	$dy_i = y_{i+1} - y_i$
Абсолютная скорость, dxy	$dxy_i = \sqrt{dx_i^2 - dy_i^2}$
Скорость изменения давления, dp	$dp_i = p_{i+1} - p_i$
Горизонтальное ускорение, ddx	$ddx_i = dx_{i+1} - dx_i$
Вертикальное ускорение, ddy	$ddy_i = dy_{i+1} - dy_i$
Абсолютное ускорение, $ddxy$	$ddxy_i = dxy_{i+1} - dxy_i$
Ускорение изменения давления, ddp	$ddp_i = dp_{i+1} - dp_i$
Центростремительное ускорение, ac	$ac_i = ((x_{i+3} - x_{i+2})(y_{i+3} + y_{i+4} - 2y_{i+2}) - (y_{i+3} - y_{i+2})(x_{i+3} + x_{i+4} - 2x_{i+2})) / 8$
Рывок по вертикали (третья производная), ddd	$ddd_i = ddy_{i+1} - ddy_i$
Абсолютный рывок (третья производная), $dddxy$	$dddxy_i = ddxy_{i+1} - ddxy_i$
Векторное произведение, s	$s_i = x_i y_{i+2} + y_i x_{i+2}$

Окончание табл. 1

End of table 1

Функция <i>Function</i>	Формула <i>Formula</i>
v	$v_i = \sin(ang_i) dx_i dy_i dx_{i+1} dy_{i+1}$
$d2$	$d2_i = x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i$
Угол между соседними точками, ang	$ang_i = \arctan(x_{i+1}, y_{i+1}) - \arctan(x_i, y_i)$
Косинус угла между двумя точками, $\cos XY$	$\cos XY_i = \frac{dx_i}{\sqrt{dx_i^2 + dy_i^2}}$
Скорость изменения угла, $dang$	$dang_i = ang_{i+1} - ang_i$
Площадь треугольника из трех последовательных точек подписи, $area$	$area_i = ((x_i - x_{i+2})(y_{i+1} - y_{i+2}) - (x_{i+1} - x_{i+2})(y_i - y_{i+2}))/2$

Для данных каждой подписи вычисляются указанные признаки. Как описать образ подписи, представленной массивами признаков, длина которых различна? Одним из вариантов является нормализация длины массивов исходных данных X, Y, P до единого размера. Этот подход имеет два недостатка: массивы поддельных подписей часто длиннее, чем массивы оригинальных, и нормализация частично теряет данные о динамике подписи; размерность массивов равна сотням, что делает признаковое пространство с такой размерностью бесполезным для 7–20 образцов.

Решением проблемы является сравнение близости однотипных признаков между парами подписей. Подобный подход был успешно апробирован при верификации статических подписей в работе [8], но там использовались только два признака и вычислялась ранговая корреляция между гистограммами значений этих признаков. Гистограммы позволяли уменьшить размерность признакового описания до количества используемых интервалов. После экспериментов по сравнению коэффициентов корреляции гистограмм вышеуказанных признаков было решено использовать другой метод их сравнения, так как гистограммное представление теряет локальную динамику исполнения подписи.

Для сравнения массивов признаков был выбран алгоритм dtw , разработанный Беллманом [9]. Он позволяет вычислять расстояния между двумя дискретными кривыми, которые имеют разное число точек. По результатам международного конкурса алгоритмы на базе dtw были признаны лучшими для сравнения признаков динамических подписей [10].

В настоящей работе $dtw(dy^1, dy^2)$, например, обозначает расстояние, вычисленное между массивами вертикальных скоростей двух подписей (верхние индексы указывают на номера подписей). Все dtw -расстояния неотрицательны и вычисленные для признаков из табл. 1 могут использоваться как координаты, описывающие близость пар подписей вдоль осей в K -мерном признаковом пространстве.

Признаковое пространство, построенное на базе dtw -расстояний между парами массивов признаков, которые вычисляются для разных подписей, позволяет увеличивать количество образцов, описывающих N подлинных подписей человека, до N_2 образцов, но уже описывающих сходство пар подписей. По ним строится образ подлинных подписей одного человека в признаковом пространстве размерностью K . В данной статье использовалось $K = 18$. В табл. 2 показано, как возрастает число образцов N_2 в признаковом пространстве при разных значениях доступных подлинных подписей N . Для сравнения приведено количество образцов подписей, используемых в общепринятых методах верификации.

Таблица 2
 Число образцов при разном количестве доступных подлинных подписей

Table 2
 Number of samples with different numbers of available genuine signatures

Общепринятая верификация <i>Common verification</i>		Попарная верификация <i>Pairwise verification</i>	
Верифицируемая подпись <i>Verifiable signature</i>	Подлинные подписи, N штук <i>Original signatures, N things</i>	Образцы пар с верифицируемой подписью, N штук <i>Sample pairs with a verifiable signature, N things</i>	Образцы пар подлинных подписей, $N_2=N(N-1)/2$ штук <i>Sample pairs of genuine signatures, $N_2=N(N-1)/2$ things</i>
1	7	7	21
1	10	10	45
1	15	15	105
1	19	19	171
1	24	24	276

Возникает задача описания образа подписей человека и определения критерия, позволяющего отличить его подлинные подписи от поддельных. Для этого следует построить область в признаковом пространстве, которая охватывает подписи конкретного человека. Самый простой вариант – построить гиперсферу, охватывающую множество dtw -расстояний между парами признаков подписей человека. Это простейшая выпуклая фигура, охватывающая все образцы в признаковом пространстве.

Был выполнен ряд экспериментов на динамических подписях из самой большой доступной базы данных DeepSignDB (URL: <https://github.com/BiDALab/DeepSignDB>). Следует отметить, что данные подписей перед вычислением dtw -расстояний не подвергались нормализации, поскольку ранее в работе [11] было экспериментально доказано, что она снижает точность верификации.

Эксперименты показали, что совокупности значений некоторых признаков представляют собой очень узкие области, а dtw -расстояния между признаками разных типов имеют существенно различные диапазоны значений. Автором было принято решение использовать проекции признакового пространства на плоскости, определенные двумя признаковыми осями, и строить выпуклые множества, описывающие точки, которые представляют собой dtw -расстояния, соответствующие этим осям (рис. 5, b , c). Возможное число таких проекций равно $K(K-1)/2$. В данной работе число проекций ограничено числом $K/2$, причем для проекций использованы оси, образованные парами признаков, которые указаны в табл. 1.

Критерий подлинности определен следующим образом. Если новый образец, образованный парой (исходная подлинная подпись, верифицируемая подпись), попадает в большинство выпуклых множеств, образованных проекциями образа пар подлинных подписей в признаковом пространстве, принимается решение, что исследуемая подпись может считаться похожей на ту подлинную, с которой она сравнивалась. Так повторяется $K/2$ раз для всех проекций и верифицируемых пар подписей. Если большая часть из них попадает M раз ($M > K/4$) в выпуклые множества проекций образа подлинной подписи, принимается решение о подлинности верифицируемой подписи. Иначе подпись считается поддельной.

Выбор наиболее значимых для верификации признаков можно выполнять на глобальном уровне и на локальном. В данной работе первоначально модель образа подписей человека строилась в 18-мерном признаковом пространстве. Далее на глобальном уровне оценивалось число ошибок верификации на большом количестве людей и их подписей из доступных баз данных. На рис. 6 показаны графики суммарных попаданий 2500 подлинных (синяя линия) и 2500 поддельных (красная линия) подписей 100 человек в выпуклые многоугольники, построенные на проекциях образов подписей каждого человека. Очевидно, что шестая и восьмая проекции дают гораздо больше ошибок при верификации поддельных подписей. По этой причине четыре признака, определяющие эти проекции, были исключены во второй модели обра-

за подлинных подписей произвольного человека, описанного в 14-мерном признаком пространстве.

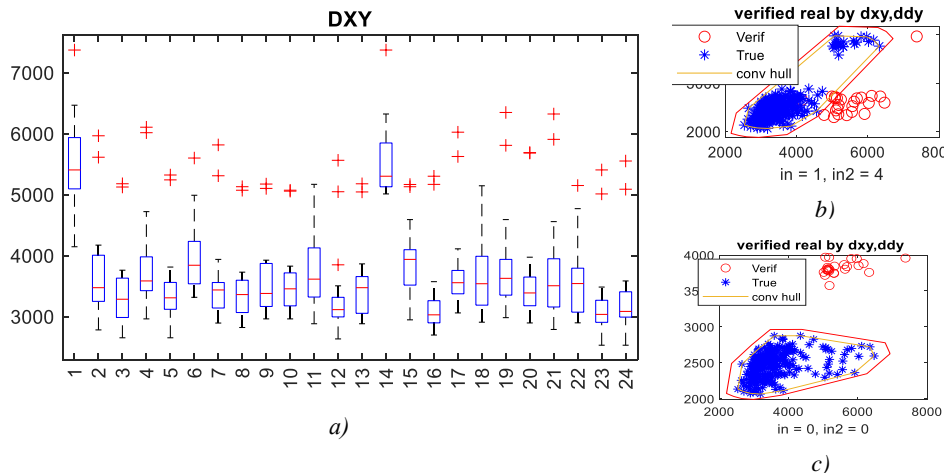


Рис. 5. Диаграммы размаха dtw -расстояний абсолютных скоростей dxu между каждой подлинной подписью и остальными 24 подписями человека с идентификатором U0184 (a); проекции образа подписей этого человека на плоскость (dxu, ddu) , построенные с использованием 14-й подписи (b) и без нее (c)

Fig. 5. Box-plots of dtw -distances of absolute velocities dxu between each genuine signature and the remaining 24 signatures of a person with the IDR U0184 (a); projections of this person signature pattern onto the plane (dxu, ddu) , constructed using the 14th signature (b) and without it (c)

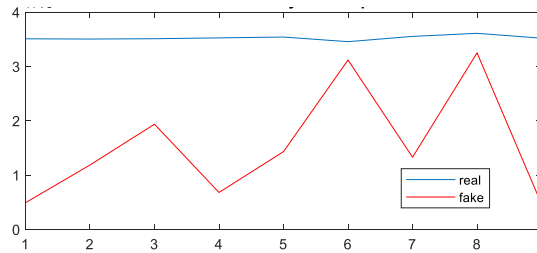


Рис. 6. Графики попадания образов подписей 100 человек (по 25 подлинных и фальшивых каждого) в девять проекций при $N=15$ (единицы измерений вертикальной шкалы десятки тысяч)

Fig. 6. Graphs of signature patterns of 100 people (25 genuine and fake each) falling into nine projections with $N=15$ (vertical scale units tens of thousands)

4. Уточнение образа подлинных подписей человека. Пусть имеется M подлинных подписей некоего человека. Тогда на локальном уровне можно оценить качество образа подписей этого человека, построенного по принципу сравнения одной подлинной подписи и модели образа, построенного по остальным $(M-1)$ подлинным. Если признаки подписи существенно искажают образ подписи, ее не следует использовать для его построения. На рис. 5, a показано, что для $M = 25$ признак скорости написания 14-й подписи dxu человека с идентификатором U0184 существенно отличается от значений этого признака при сравнении других подписей между собой. На рис. 5, b показано, что такая подпись не попадает в проекцию образа подписей этого человека по данному признаку.

Для подписей каждого человека строился индивидуальный образ на базе признаков, извлеченных из N первых подлинных подписей. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для достижения высокой точности объективной верификации динамических подписей необходимо не менее 10 подлинных подписей одного человека. Анализируя признаки его подписи, следует удалять те подписи, которые существенно отличаются от остальных, и не использовать динамические признаки, которые чаще других не позволяют определять фальшивые подписи.

Из рис. 5, *a* видно, что первая и 14-я подлинные подписи человека U0184 существенно отличаются от остальных по признаку абсолютной скорости исполнения подписи. Представлены два варианта проекций образов подписи, описанные признаками dxu и ddu в виде 276 синих точек, которые очерчены выпуклым многоугольником. Красными кружками показаны dtw -расстояния от 14-й подписи до остальных 24, по которым построен образ подлинных подписей человека. Если при построении образа подписей данного человека использовать первую и 14-ю подписи, образ существенно увеличится в признаковом пространстве, что может привести к неверной верификации поддельных подписей. Dtw -расстояния 14-й подписи по признаку ddy превышают расстояния между парами остальных подлинных подписей в 1,5–2 раза.

Графики на рис. 7 также указывают на выбросы dtw -расстояний по признакам $ddxy$, ddy , dy от 14-й подлинной подписи человека U0184 до его остальных подписей. При построении классификатора подписей человека необходимо использовать подобный численный анализ данных о признаках при построении образа его подписей в признаковом пространстве. На примере подписей этого человека показано, что образ подлинных подписей каждого человека следует строить индивидуально, выбирая наиболее общие признаки сходства подписей. Подлинные подписи могут существенно отличаться по разным причинам: подпись не выработана, подпись выполнена в неудобных условиях, человек болен, подпись сознательно искажается с целью признания ее фальшивой впоследствии и др.

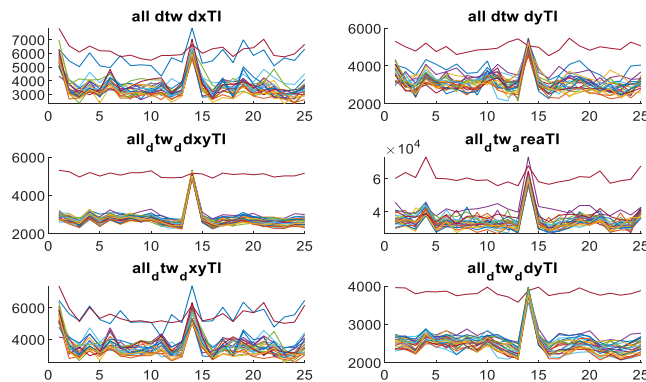


Рис. 7. Выбросы dtw -расстояний, вычисленных по признакам $ddxy$, ddy , dy 14-й подписи человека U0184

Fig. 7. Dtw -distances outliers calculated by the features $ddxy$, ddy , dy of the fourteenth signature of person U0184

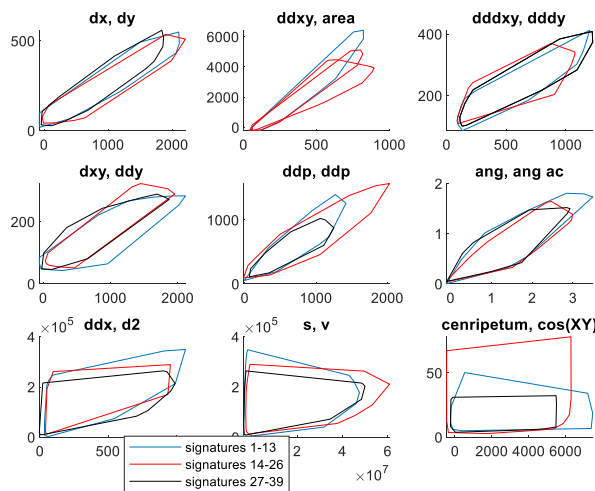


Рис. 8. Проекция трех образов подписей человека U1009, построенных по трем непересекающимся группам подписей для $N=13$

Fig. 8. Projections of three signature patterns of person U1009, constructed from three disjoint groups of signatures for $N=13$

На рис. 8 показано, что образ подлинных подписей человека существенно зависит от изменчивости конкретных подписей, использованных для его построения. Все оси на рис. 8 имеют разный масштаб.

Верифицируемая подлинная подпись на рис. 9, а не попадает в проекцию, образованную признаками «угол» и «изменение угла» (ang, ang_ac). Поддельная подпись человека, наоборот, попадает в проекцию, образованную признаками «скорость» и «ускорение изменения давления» (dp, ddp). Учитывая попадание в образ большей части признаков, вычисленных по парам подписей, можно сделать верное заключение о подлинности анализируемой подписи. Отметим, что признаки на базе углов не используются во второй модели образа подписей.

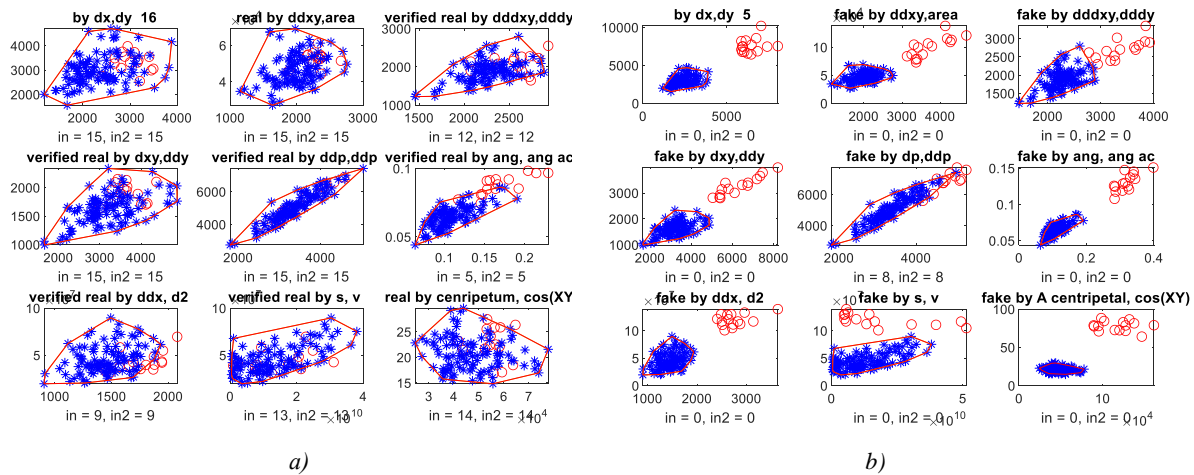


Рис. 9. Проекция образа подлинных подписей человека (синие точки), верификация подписи (красные кружки) подлинной (а) и поддельной (b)

Fig. 9. Projections of a pattern of a person's genuine signatures (blue dots), verification of a signature (red circles) genuine (a) and fake (b)

При использовании девяти проекций образа подлинных подписей человека общая точность не превышает 90,9 % при $N = 10$, а при увеличении N она немного снижается (рис. 10). При семи проекциях точность распознавания поддельных подписей составляет примерно 99 % независимо от N , а точность распознавания подлинных подписей растет с увеличением N .

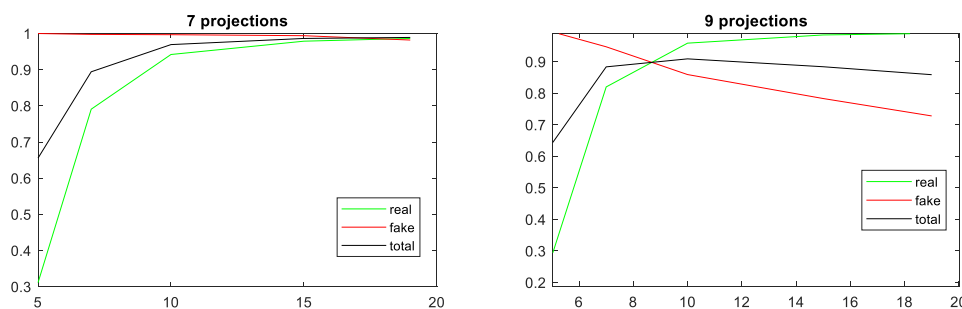


Рис. 10. Точность верификации подписей 100 пользователей при использовании семи и девяти проекций образов подлинных подписей

Fig. 10. Accuracy of signatures verification of 100 clients using seven and nine projections of patterns of genuine signatures

В табл. 3 собраны результаты верификации подписей 230 человек, по 25 подлинных и 25 поддельных каждого, а их общее число равно 11 500. Символ R означает подлинные подписи, символ F – поддельные, индекс 1 означает первую модель признакового пространства (18 признаков), индекс 2 – вторую (14 признаков). Образы подписей каждого человека строились по его первым N подлинным подписям, представленным в базе. Затем верифицировались все подписи каждого человека (50 штук).

Таблица 3
 Точность верификация 11 500 подписей 230 человек из базы DeepSignDB

Table 3
 Verification accuracy of 11,500 signatures of 230 people from the DeepSignDB database

Число подлинных подписей для построения образа, N Number of genuine signatures to build the pattern, N	5	7	10	13	15	19
Точность $R1$ Accuracy $R1$	0,2977	0,8181	0,9517	0,9746	0,9802	0,9873
Точность $F1$ Accuracy $F1$	0,9918	0,9344	0,8398	0,7965	0,7567	0,7068
Общая точность 1 Overall accuracy 1	0,6448	0,8763	0,8957	0,8856	0,8684	0,8470
Точность $R2$ Accuracy $R2$	0,3150	0,7911	0,9344	0,9656	0,9737	0,9830
Точность $F2$ Accuracy $F2$	0,9998	0,9976	0,9960	0,9939	0,9923	0,9910
Общая точность 2 Overall accuracy 2	0,6574	0,8943	0,9652	0,9797	0,9830	0,9870

Анализируя табл. 3, можно сделать два вывода:

- первая модель дает несколько больше ошибок верификации;
- числа подлинных подписей $N < 10$ для построения образа подписи человека недостаточно для надежной верификации. Оптимальным является $N = 15$. Увеличение N не дает существенного прироста точности, но увеличивает время вычислений. Отметим, что точность верификации поддельных подписей во второй модели более 0,99 при любом N , но точность определения подлинных подписей существенно зависит от N из-за вариативности исполнения подписи человеком. Лучшие значения точности верификации выделены жирным шрифтом.

Заключение. В работе были выполнены эксперименты по верификации подлинных и поддельных подписей 498 человек (по 25 подлинных и поддельных подписей) из базы DeepSignDB. Для каждого человека строился индивидуальный образ его подписей. При использовании $N = 15$ и без оптимизации образа конкретного человека была получена точность распознавания порядка 98 % при анализе 24 900 подписей этих людей.

На примере анализа подписей сотен людей показано, что простейший вариант верификации динамической подписи может быть реализован на базе порогового классификатора. Если одномерный или многомерный признак попадает в определенный диапазон значений, подпись относится к классу подлинных, иначе – фальшивых. Обобщением такого классификатора является выпуклый K -мерный многогранник, где K – размерность признакового пространства. Такой многогранник дает более точные результаты, чем совокупность его проекций на несколько плоскостей, однако выпуклые многоугольники на плоскости строить проще и быстрее.

На примерах десятков тысяч подписей сотен человек продемонстрирована высокая точность нового метода верификации динамических подписей с использованием классификатора, который строится для каждого человека индивидуально по ограниченному множеству его подлинных подписей.

Список использованных источников

1. Ярошук, И. А. Проблемные вопросы экспертизы подписи как малообъемного почеркового объекта / И. А. Ярошук, К. В. Гриневиц // Актуальные проблемы российского права. – 2021. – Т. 129, № 8. – С. 141–151.
2. Мещеряков, В. А. Оценка возможностей почерковедческой экспертизы сквозь призму современных информационных технологий / В. А. Мещеряков, В. В. Бутов // Вестн. Воронежского ин-та МВД России. – 2017. – № 2. – С. 40–46.
3. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work / H. Kaur, M. Kumar // J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2023. – Vol. 14, no. 2. – P. 1027–1045.
4. Ratanamahatana, C. A. Everything you know about dynamic time warping is wrong / C. A. Ratanamahatana, E. Keogh // Third Workshop on Mining Temporal and Sequential Data, Seattle, USA, 22 Aug. 2004. – Seattle, 2004. – P. 50–60.

5. Fenton, D. Evaluation of features and normalization techniques for signature verification using dynamic timewarping / D. Fenton, M. Bouchard, T. H. Yeap // 2006 IEEE Intern. Conf. on Acoustics Speed and Signal Processing Proc., Toulouse, France, 14–19 May 2006. – Toulouse, 2006. – Vol. 3. <https://doi.org/10.1109/icassp.2006.1660860>
6. Discriminative feature selection for on-line signature verification / X. Xia [et al.] // Pattern Recognition. – 2018. – Vol. 74. – P. 422–433.
7. Mobile signature verification: Feature robustness and performance comparison / M. Martinez-Diaz [et al.] // IET Biometrics. – 2014. – Vol. 3, no. 4. – P. 267–277.
8. Starovoitov, V. Writer-dependent approach to off-line signature verification / V. Starovoitov, U. Akhundjanov // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023) : Proc. of the 16th Intern. Conf., Minsk, Belarus, 17–19 Oct. 2023. – Minsk, 2023. – P. 241–244.
9. Bellman, R. On the theory of dynamic programming / R. Bellman // Proc. of the National Academy of Sciences. – 1952. – Vol. 38(8). – P. 716–719.
10. BioSecure signature evaluation campaign (BSEC'2009): Evaluating online signature algorithms depending on the quality of signatures / N. Houmani [et al.] // Pattern Recognition. – 2012. – Vol. 45, no. 3. – P. 993–1003.
11. Старовойтов, В. В. Следует ли нормализовать данные динамических подписей перед верификацией методом DTW? / В. В. Старовойтов // BIG DATA и анализ высокого уровня : сб. науч. ст. X Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13 марта 2024 г. : в 2 ч. – Минск, 2024. – Ч. 2. – С. 391–400.

References

1. Jaroshhuk I. A., Grinevich K. V. *Problematic issues of examination of a signature as a small-volume handwriting object*. Aktual'nye problemy rossijskogo prava [Current Problems of Russian Law], 2021, vol. 129, no. 8, pp. 141–151 (In Russ.).
2. Meshherjakov V. A., Butov V. V. *Assessing the capabilities of handwriting examination through the prism of modern information technologies*. Vestnik Voronezhskogo instituta Ministerstva vnutrennih del Rossii [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2017, no. 2, pp. 40–46 (In Russ.).
3. 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. 1027–1045.
4. Ratanamahatana C. A., Keogh E. Everything you know about dynamic time warping is wrong. *Third Workshop on Mining Temporal and Sequential Data, Seattle, USA, 22 August 2004*. Seattle, 2004, pp. 50–60.
5. Fenton D., Bouchard M., Yeap T. H. Evaluation of features and normalization techniques for signature verification using dynamic timewarping. *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing Proceedings, Toulouse, France, 14–19 May 2006*. Toulouse, 2006, vol. 3. <https://doi.org/10.1109/icassp.2006.1660860>
6. Xia X., Song X., Luan F., Zheng J., Chen Z., Ma X. Discriminative feature selection for on-line signature verification. *Pattern Recognition*, 2018, vol. 74, pp. 422–433.
7. Martinez-Diaz M., Fierrez J., Krish R. P., Galbally J. Mobile signature verification: Feature robustness and performance comparison. *IET Biometrics*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 267–277.
8. Starovoitov V., Akhundjanov U. Writer-dependent approach to off-line signature verification. *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, 17–19 October 2023*. Minsk, Belarus, 2023, pp. 241–244.
9. Bellman R. On the theory of dynamic programming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1952, vol. 38(8), pp. 716–719.
10. Houmani N., Mayoue A., Garcia-Salicetti S., Dorizzi B., Khalil M. I., ..., Vivaracho-Pascual C. BioSecure signature evaluation campaign (BSEC'2009): Evaluating online signature algorithms depending on the quality of signatures. *Pattern Recognition*, 2012, vol. 45, no. 3, pp. 993–1003.
11. Starovoitov V. V. *Should we normalize dynamic signatures data before DTW-based verification? BIG DATA i analiz vysokogo urovnja : sbornik nauchnyh statej X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*, Minsk, 13 marta 2024 goda : v 2 chastjah [BIG DATA and Advanced Analytics : Collection of Scientific Articles of the X International Scientific and Practical Conference, Minsk, 13 March 2024 : in 2 Parts]. Минск, 2024, part 2, pp. 391–400 (In Russ.).

Информация об авторе

Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Information about the author

Valery V. Starovoitov, D. Sc. (Eng.), Prof., The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: valerys@newman.bas-net.by