

УДК: 004.932.2

## Идентификация онлайн-подписи с помощью оконного преобразования Фурье и радиального базиса

Э. С. Анисимова

Елабужский институт Казанского федерального университета,  
физико-математический факультет  
Россия, 423600, Республика Татарстан, г. Елабуга, ул. Казанская, д. 89

E-mail: ESAnisimova@kpfu.ru

Получено 1 апреля 2014 г.,  
после доработки 12 июня 2014 г.

В данной работе описан метод идентификации онлайн-подписи с использованием оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования с радиальным базисом специального вида. При идентификации используются динамические характеристики подписи. Приведены оценки достоверности предложенной процедуры.

Ключевые слова: онлайн-подпись, оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, радиальный базис

### On-line signature identification using a short-time Fourier transform and the radial basis

E. S. Anisimova

*Yelabuga Institute of Kazan Federal University, Faculty of Physics and Mathematics, 89 Kazanskaya st.,  
Yelabuga, Tatarstan Republic, 423600, Russia*

**Abstract.** — This paper describes a method of on-line signature identification using the short-time Fourier transform and wavelet transform with radial basis of a special kind. In carrying out the identification, we use dynamic properties signature. We adduce the assessment of the reliability of the proposed procedure.

Keywords: on-line signature, short-time Fourier transform, wavelet transform, radial basis

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 357–364 (Russian).

## Введение

Несмотря на наличие большого числа методов биометрической идентификации личности (по отпечаткам пальцев, по радужной оболочке глаза, по сетчатке глаза, по геометрии руки, по термограмме лица, по голосу и т. п.), в задачах идентификации широко применяется *подпись* [Jain, Friederike, Connel, 2002].

Первоначально подпись рассматривалась только как графический объект (*статическая подпись*), но с появлением новых устройств ввода (графические планшеты, смартфоны) возникла задача идентификации *динамической*, онлайн-подписи, то есть подписи вместе с динамикой ее создания [Plamondon, Srihari, 2000].

Разработанные системы идентификации личности, работающие с динамическими подписями, построены на анализе динамики воспроизведения подписи в одной, двух или трех координатах ( $X(t)$  — движение пера по оси  $X$ ,  $Y(t)$  — движение пера по оси  $Y$ ,  $Z(t)$  — интенсивность нажатия пера).

Получив образцы подписи, система идентификации раскладывает зависимости  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  каждой подписи в ряд. Для этого, как правило, вычисляется дискретное преобразование Фурье, также могут использоваться функции Уолша и Хаара. Производятся статистическая обработка коэффициентов, вычисляется ряд средних значений, которые становятся эталонными. Определяются стандартные отклонения (или расстояния) от них, необходимые для установления порога несоответствия новой подписи оригиналу.

В режиме аутентификации подпись сначала раскладывается в ряд, затем полученный ряд сравнивается с эталоном [Воронцов, 2011]. Если порог несоответствия не превышает, подпись считается действительной, аутентификация подтверждается.

Однокоординатные системы идентификации подписи, построенные путем учета любой из временных функций  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$ , обеспечивают вероятность ошибок первого и второго рода на уровне 0.1. Двухкоординатные системы позволяют достичь уровня вероятности ошибок порядка 0.01. Наиболее сложные системы, использующие полную тройку функций, обеспечивают уровень вероятности ошибок первого/второго рода 0.003 [Иванов, 2005].

Однако задача идентификации подписи не может рассматриваться как решенная окончательно. Как показано в работе [Unser, Blu, 2002], при исследовании неоднородных сигналов достаточно мощным инструментом выступает вейвлет-преобразование с неортогональным радиальным базисом. Оно устойчиво к смещению и позволяет получить интегральную характеристику сигнала. Кроме того, используемое в задачах идентификации преобразование Фурье не учитывает динамику сигнала, оно позволяет получить лишь информацию о частоте, присутствующей в сигнале подписи. В этой связи в данной работе исследуется возможность идентификации онлайн-подписи с помощью частотно-временного оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования с радиальным базисом.

## Частотно-временное оконное преобразование Фурье сигнала подписи

Онлайн-подпись представляется в виде текстового файла, каждая запись которого есть вектор  $p_n = (x_n, y_n)$ ,  $n = 0 \dots N - 1$ , заданный координатами очередной точки (сила нажима в данном случае не учитывается). Поскольку положение очередной точки определялось через равные интервалы времени, в указанном описании учитывалась динамика подписи.

Рассмотрим подпись на комплексной плоскости. Для этого построим последовательность комплексных чисел  $\{z_n\}$ ,  $n = 0 \dots N - 1$ , вида

$$z_n = x_n + i \times y_n, \quad (1)$$

где  $(x_n, y_n)$  — координаты точки.

К полученной последовательности  $\{z_n\}$  можно применить комплексное преобразование Фурье:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{\frac{-2\pi i k n}{N}}, \quad k=0 \dots N-1, \quad (2)$$

где  $N$  — количество точек введенной подписи,  $k$  — номер текущего отсчета преобразования Фурье,  $F_k$  — комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал. Построим график  $|F_k|$ ,  $k=0 \dots N-1$ .

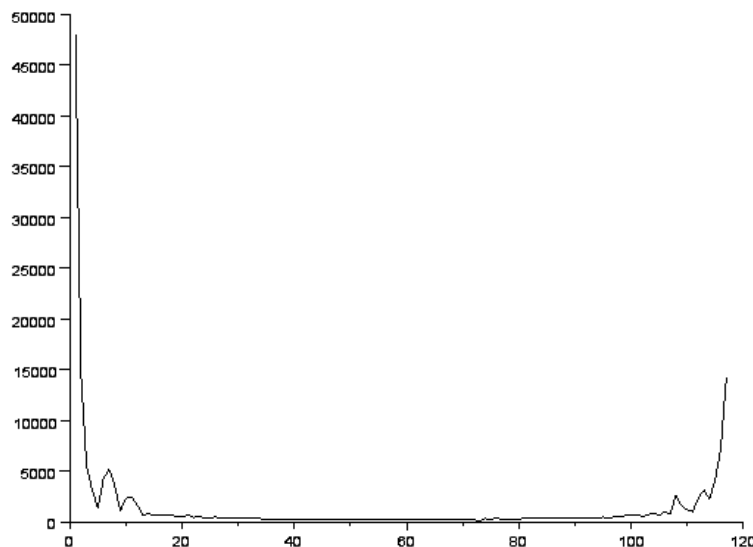


Рис. 1. Модуль комплексного преобразования Фурье сигнала подписи

Полученную функцию можно использовать для исследования подписи. Однако преобразование Фурье имеет недостаток: оно дает информацию только о частоте, которая присутствует в сигнале, и не дает никакой информации, в какой промежуток времени эта частота присутствует в сигнале. Так как мы исследуем динамическую подпись, то правильнее использовать для ее исследования другой инструмент спектрального анализа — оконное преобразование Фурье. Частотно-временное оконное преобразование является разновидностью преобразования Фурье и определяется следующим образом:

$$F(w, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} z_n w_{n-m} e^{-iwn}, \quad (3)$$

где  $w_{n-m}$  — функция окна сдвига преобразования,  $m$  — фиксированные значения сдвига. В качестве окна преобразования может использоваться как прямоугольное окно, так и специальные весовые окна (Барлетта, Гаусса, Хэмминга и др.).

Результатом оконного преобразования Фурье является не спектр исходного сигнала, а спектр произведения сигнала и оконной функции. Спектр, полученный при помощи оконного преобразования Фурье, является оценкой спектра исходного сигнала. Оконное преобразование позволяет получать характеристику распределения частоты сигнала (с амплитудой) во времени.

Проведем исследование онлайн-подписи в комплексной плоскости, применяя оконное преобразование Фурье. В качестве оконной функции возьмем окно Хэмминга с шириной окна  $N=16$ .

Спектрограмма сигнала подписи, полученная с помощью оконного преобразования Фурье, будет иметь следующий вид:

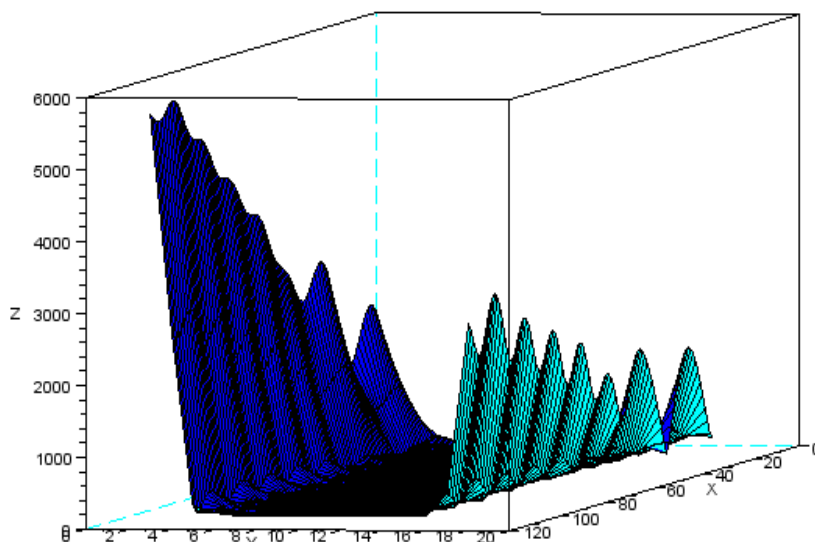


Рис. 2. Спектрограмма сигнала подписи

Здесь  $X$  — время (смещение),  $Y$  — частота (номер коэффициента),  $Z$  — амплитуда (модуль коэффициента).

## Вейвлет-преобразование с радиальным базисом

Формально полученную функцию подписи (функцию двух переменных) можно использовать для описания подписи, однако индивидуальность проявляется в зависимости значений этой функции в разных точках. С этой целью для отыскания такой зависимости был использован подход, представленный в [Unser, Blu, 2002]. Этот подход основывается на применении радиальных функций и вейвлетов к исследованию функции подписи.

Применим вейвлет-преобразование с радиальным базисом к функции подписи:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij} \rho(\|z - z_{ij}\|) = F, \quad (4)$$

где  $\|z - z_{ij}\|$  — евклидово расстояние между точками  $z = (x, y)$  и  $z_{ij} = (x_i, y_j)$ ;  $i = 1 \dots N$  — время;  $j = 1 \dots M$  — частота;  $\rho(\|z - z_{ij}\|) = \|z - z_{ij}\|^\alpha$  — радиальная функция,  $0 < \alpha < 1$ ;  $\{a_{ij}\}_{i=1..N; j=1..M}$  — матрица весовых коэффициентов;  $F = F(z)$  — значение функции в точке  $z = (x, y)$ .

Здесь функция  $F$  представлена в виде суммы  $N \times M$  радиальных базисных функций с центрами  $\{z_{ij}\}_{i=1..N; j=1..M}$  и весовыми коэффициентами  $\{a_{ij}\} = \{a_{ij}\}_{i=1..N; j=1..M}$ .

Видим, что (4) представляет собой свертку вейвлет-функции  $\rho$  (в качестве вейвлет-функции взята радиальная функция) с сигналом  $\{a_{ij}\}$ , а значит это дискретное вейвлет-преобразование. Оно переводит исходную функцию в форму, которая делает некоторые ее величины более поддающимися изучению, позволяет получить высокое соотношение сжатия в сочетании с хорошим качеством восстановленного сигнала [Астафьева, 1996].

Признаками подписи являются коэффициенты  $\{a_{ij}\}$  представления функции подписи через радиальный базис.

Для каждого из экземпляров подписей построим и решим систему уравнений (4) относительно коэффициентов  $\{a_{ij}\}$ .

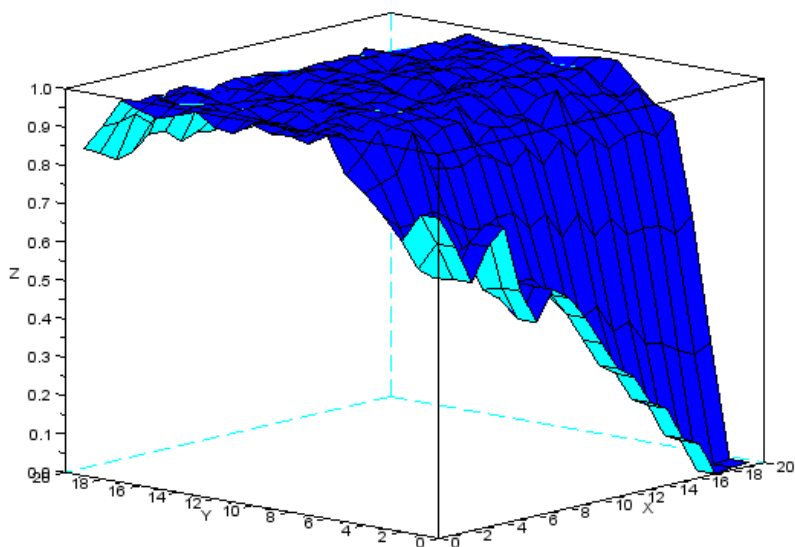


Рис. 3. Поверхность, полученная значениями матрицы коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  ( $\alpha = 0.001$ ) экземпляра подписи одного из участников эксперимента

При построении поверхностей предварительно выполним нормализацию значений для того, чтобы иметь возможность их дальнейшего сравнения. Построим поверхности для остальных участников и далее проведем проверку достоверности идентификации.

Введем метрику для коэффициентов  $\{a_{ij}\}$ . Для этого первоначально определим матрицу средних значений  $\{\bar{a}_{ij}\}$  для всех экземпляров подписи автора. Далее вычислим расстояние от «усредненной» матрицы  $\{\bar{a}_{ij}\}$  подписей автора до матрицы коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  каждого экземпляра его подписей.

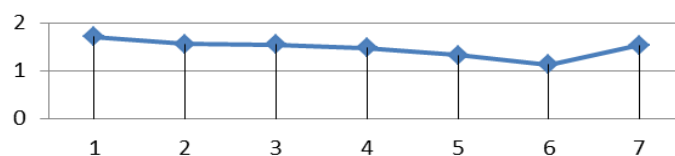


Рис. 4. Расстояния от «усредненной» матрицы  $\{\bar{a}_{ij}\}$  подписей автора до матрицы коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  каждого экземпляра его подписей

Среднее значение расстояний равно 1.60.

В ходе исследования выяснилось, что расстояние между матрицами коэффициентов подписей, выполненных разными людьми, превышает расстояние между матрицами коэффициентов подписей одного автора (для данного автора среднее значение расстояний от матрицы  $\{\bar{a}_{ij}\}$  автора до матриц  $\{a_{ij}\}$  экземпляров подписей других авторов составило 5.06). Этот факт открывает возможность для идентификации подписей путем применения вейвлет-преобразования с радиальным базисом и дальнейшим сравнением подписей с учетом вводимой метрики. Можно ввести определенный порог при сравнении расстояний между матрицами коэффициентов. Если расстояние между матрицами коэффициентов подписей  $A$  и  $B$  будет ниже порога, то принимается решение об идентичности подписей  $A$  и  $B$ , если же расстояние между матрицами подписей  $A$  и  $B$  будет выше порога, то считается, что они принадлежат разным авторам.

## Эксперимент по идентификации подписи с помощью оконного преобразования и радиального базиса

Эксперимент по идентификации подписи с помощью оконного преобразования и радиальных функций проводился на 20 участниках. Для каждого из участников было использовано для исследования по 6–7 экземпляров подписей.

Рассмотрим процесс идентификации одного из участников. Предварительно поделим все подписи на 2 класса:

- 1-й класс: подписи автора;
- 2-й класс: подписи остальных участников.

Будем производить сравнение двух построенных классов, т. е. сравнивать подписи автора и подписи остальных участников.

Каждой подписи соответствует матрица коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  разложения через радиальный базис. Вычислим расстояния между усредненной матрицей коэффициентов  $\{\bar{a}_{ij}\}$  подписей автора (1 класса) и матрицами коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  всех подписей (матрицами 1 и 2 классов). Таким образом, сформируем вектор расстояний  $(r_1, r_2, \dots, r_s, r_{s+1}, \dots, r_n)$ , где  $n$  — число подписей,  $r_1, r_2, \dots, r_s$  — расстояния между матрицами коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  1 класса и усредненной матрицей коэффициентов  $\{\bar{a}_{ij}\}$  1 класса и  $r_{s+1}, \dots, r_n$  — расстояния между матрицами коэффициентов  $\{a_{ij}\}$  2-го класса и усредненной матрицей  $\{\bar{a}_{ij}\}$  1-го класса.

Для представления результатов идентификации построим ROC-кривую (Receiver Operator Characteristic) [Паклин, 2013]. ROC-кривая часто используется для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении. Поскольку классов два, один из них называется классом с положительными исходами (обозначим подписи автора, 1-й класс), второй — с отрицательными исходами (подписи остальных участников, 2-й класс).

ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров. В терминологии ROC-анализа первые называются истинно положительным, вторые — ложно отрицательным множеством. При этом предполагается, что у классификатора имеется некоторый параметр (порог), варьируя который мы будем получать то или иное разбиение на два класса. В зависимости от него будут получаться разные величины ошибок I и II рода. *Ошибка I рода* — вероятность принять подпись автора за фальшивую. *Ошибка второго рода* равна вероятности принять ложную подпись за подпись автора.

Итак,  $\{r_s\}_{s=1}^n$  — вектор расстояний, где  $n$  — общее число подписей всех участников. Определим минимальное  $r_{\min}$  и максимальное  $r_{\max}$  значения элементов вектора  $\{r_s\}_{s=1}^n$ . Разобьем отрезок  $[r_{\min}; r_{\max}]$  на  $M$  равных частей с шагом  $h = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{M}$ , получим вектор  $\{\tau_i\}_{i=0}^M$ , где

$\tau_0 = r_{\min}$ ,  $\tau_M = r_{\max}$ ,  $\tau_{i+1} = \tau_i + h$ . Для каждого значения порога  $\tau_i$ ,  $0 \leq i \leq M$ :

- 1) определяем подписи, для которых соответствующее значение расстояния  $r_s$  меньше  $\tau_i$ , и проверяем, действительно ли это подписи автора. Определяем значение чувствительности (*sensitivity*) — отношение количества верно классифицированных подписей автора к общему количеству подписей автора;
- 2) определяем подписи, для которых соответствующее значение расстояния  $r_s$  больше  $\tau_i$ , и проверяем, действительно ли это подписи, не принадлежащие автору. Определяем значение специфичности (*specificity*) — отношение количества верно классифицированных подписей, не принадлежащих автору, к общему количеству подписей остальных участников.

Таким образом, формируем ROC-кривую (рис. 5): определяем вектор чувствительности  $\{se_i\}_{i=0}^M$  и вектор специфичности  $\{sp_i\}_{i=0}^M$ , по оси  $Y$  откладываем значения  $\{se_i\}_{i=0}^M$ , по оси  $X$  —  $\{1 - sp_i\}_{i=0}^M$ .

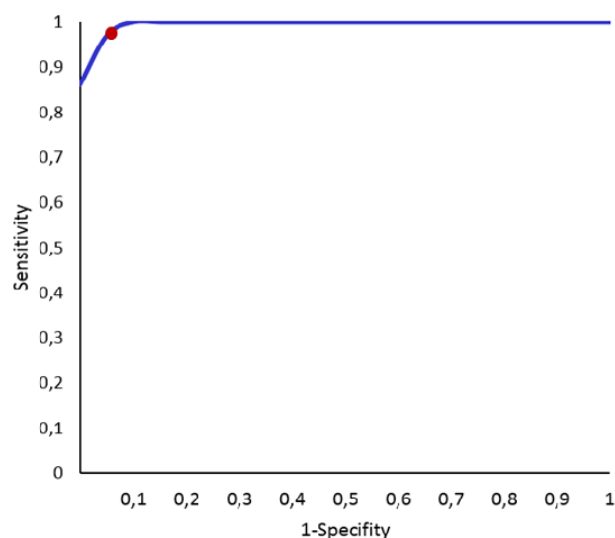


Рис. 5. ROC-кривая одного из участников эксперимента

Значение порога (для данного автора 1.91) для принятия решения найдем исходя из баланса между чувствительностью и специфичностью. В соответствии с выбранным значением порога для идентификации подписи определяются величины ошибок первого и второго рода. Значение порога определяется индивидуально для каждого автора.

В результате проведенного эксперимента средняя величина ошибки первого рода составила 4.4 %, величина ошибки второго рода 3.6 %.

## Заключение

Проведен анализ подписи как биометрической характеристики с учетом динамики. Реализован метод идентификации онлайн-подписи с помощью преобразования Фурье и вейвлет-преобразования с радиальным базисом. Благодаря применению оконного преобразования Фурье учитываются динамические характеристики подписи. В качестве биометрических параметров используются коэффициенты  $\{a_{ij}\}$  представления функции подписи через радиальный базис. Для представления результатов идентификации для каждого участника эксперимента построены ROC-кривые.

Предложенный способ не отрицает имеющиеся методы идентификации, он является дополнительной альтернативой при определении результатов распознавания подписи.

## Список литературы

Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166(11). С. 1145–1170.

Воронцов К. В. Машинное обучение (курс лекций, К. В. Воронцов) [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных. [2011]. URL: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Интерполяция\\_кубическими\\_сплайнами](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Интерполяция_кубическими_сплайнами) (дата обращения: 05.02.2014).

Леус А. В. Биометрическая аутентификация по динамическим характеристикам подписи [Электронный ресурс] // "Secuteck.ru" — о системах безопасности: Каталог «СКУД. Антитерроризм». 2009. URL: [http://www.secuteck.ru/articles2/sys\\_ogr\\_dost/biometric-h-autentifikac-po-dinamich-harakter-podpisi](http://www.secuteck.ru/articles2/sys_ogr_dost/biometric-h-autentifikac-po-dinamich-harakter-podpisi) (дата обращения: 07.02.2013).

- Паклин Н.* Логистическая регрессия и ROC-анализ — математический аппарат [Электронный ресурс] // BaseGroup Labs. Технологии анализа данных. URL: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic/> (дата обращения: 04.03.2013).
- Иванов Г. С.* Обзор методов биометрической идентификации пользователей корпоративной информационной сети // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2005. — № 20. — С. 41–48.
- Jain A. K., Friederike D. G., Connel S. D.* On-line signature verification // Pattern Recognition. — 2002. — Vol. 35(12). — P. 2963–2972.
- Plamondon R., Srihari S.* On-line and Off-line Handwriting Recognition: A Comprehensive Survey // IEEE Trans. PAMI. — 2000. — Vol. 22(1). — P. 63–84.
- Unser M., Blu T.* Wavelets, Fractals, and Radial Basis Functions // IEEE Transactions on signal processing. — 2002. — Vol. 50(3). — P. 543–553.