

تأیید امضای برخط در حوزه تبدیل موجک ایستا

مرتضی ولیزاده و احسان‌اله کبیر

می‌شوند. در روش‌های پارامتری از ویژگی‌های کلی برای توصیف امضا استفاده می‌شود و ویژگی‌های امضای مرجع^۱ با ویژگی‌های امضای آزمایش^۲ مقایسه و تصمیم‌نهایی مبنی بر اصلی یا جعلی بودن امضا گرفته می‌شود. مهم‌ترین محدودیت این روش‌ها قدرت تمایز کم آنها بین امضاهای اصلی و امضاهای جعلی است. در [۴] و [۵] ویژگی‌های پارامتری متنوعی برای تأیید امضا پیشنهاد شده و در [۶] میزان تأثیر ویژگی‌های مختلف و روش‌های انتخاب ویژگی‌های مناسب برای هر فرد بررسی شده است. در روش‌های تابعی، الگوی امضا به صورت توابعی از زمان بیان می‌شود و ویژگی‌های امضا به صورت محلی با هم مقایسه می‌شوند. این مقایسه می‌تواند نقطه به نقطه یا قطعه^۳ به قطعه انجام شود. روش‌های تابعی خطای تأیید کمتری دارند و اخیراً بیشتر محققان بر روی این روش‌ها تمرکز کرده‌اند. بزرگترین مشکل این روش‌ها یافتن نقاط متناظر دو امضا و محاسبه شباهت بین آنهاست. با توجه به این که مدت زمان امضاها حتی برای امضاها یکی فرد متفاوت است، بنابراین برای محاسبه شباهت بین دو امضا، با توالی‌های با طول زمانی متفاوتی روبه‌رو خواهیم شد. کارهای زیادی در زمینه تأیید امضای برخط به روش‌های تابعی انجام شده است که در اینجا چند نمونه از آنها را مرور می‌کنیم.

در روش‌های تابعی، ویژگی‌هایی از قبیل مسیر حرکت قلم، سرعت و شتاب حرکت آن در راستاهای x و y ، زاویه حرکت قلم و فشار وارد بر نوک آن به‌عنوان ویژگی‌های تابعی استفاده می‌شوند [۷]. مدل مخفی مارکف^۴ و پیچش زمانی پویا^۵ DTW، دو روش معروف برای محاسبه شباهت بین دو امضا هستند [۲]. در بعضی مراجع با قطعه‌بندی امضا و محاسبه شباهت بین قطعه‌های متناظر آنها نتایج مطلوبی حاصل شده است. مشکل اساسی این روش‌ها انتخاب نقاط مناسب برای قطعه‌بندی و یافتن قطعه‌های متناظر دو امضا است که در [۸] از نقاط فرینه^۶ تصویر امضا به‌عنوان مرز قطعه‌ها استفاده شده و از تطابق این نقاط برای یافتن قطعه‌های متناظر دو امضا استفاده شده است. در این مرجع با تغییر الگوریتم^۷ DP استاندارد تطابق بین نقاط فرینه هندسی تصویر امضا به‌دست آمده است و برای محاسبه شباهت بین قطعه‌ها از شبکه عصبی استفاده شده است. در این روش شکل هندسی امضا تعیین‌کننده مرز قطعه‌ها است.

در [۹] از تطابق نقاط فرینه سیگنال‌های امضاها برای یافتن نقاط متناظر دو امضا استفاده شده است و پس از یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها، همبستگی بین سیگنال‌ها محاسبه و به‌عنوان معیاری برای تأیید یا رد امضا استفاده شده است. در این مرجع نرخ خطای تأیید بالایی گزارش شده است که می‌تواند ناشی از اشتباه در تطابق نقاط فرینه باشد.

چکیده: در این تحقیق یک سیستم تأیید امضای برخط با استفاده از روش رگرسیون توسعه‌یافته در حوزه تبدیل موجک ایستا ارائه شده است. برای محاسبه شباهت بین امضاها به‌وسیله رگرسیون توسعه‌یافته، باید طول زمانی سیگنال‌های متناظر دو امضا یکسان شود. استفاده از تطابق همه نقاط برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها سبب کاهش تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی می‌شود. برای حفظ تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی، روشی بر مبنای تطابق نقاط فرینه برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها ارائه شده است. همچنین با محاسبه شباهت بین جزئیات سیگنال‌های امضاها در حوزه تبدیل موجک ایستا، دقت سیستم تأیید امضا به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده شده است. این سیستم بر روی مجموعه امضاهای SVC۲۰۰۴ آزمایش شده و نتایج آن با نتایج تیم‌های شرکت‌کننده در اولین مسابقه بین‌المللی تأیید امضا مقایسه شده است. با این روش برای امضاهای جعلی حرفه‌ای خطای تأیید ۶٪ به‌دست می‌آید که در مقایسه با تیم‌های شرکت‌کننده در این مسابقه در رتبه دوم قرار می‌گیرد و برای امضاهای جعلی تصادفی خطای تأیید وجود ندارد و از این لحاظ در رتبه اول قرار می‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از تبدیل موجک ایستا نرخ خطا را ۳۵٪ نسبت به حوزه زمان بهبود می‌دهد.

کلید واژه: رگرسیون توسعه‌یافته، نقاط فرینه، تبدیل موجک ایستا، تأیید امضای برخط، جعل حرفه‌ای.

۱- مقدمه

با گسترش تجارت و بانکداری الکترونیک، تأیید خودکار هویت افراد امری ضروری است [۱]. برای تأیید هویت افراد می‌توان از ویژگی‌های فیزیکی از قبیل اثر انگشت، چهره، کف دست، عنبیه و یا از ویژگی‌های رفتاری مانند گفتار و امضا استفاده کرد. با وجود این که امضای افراد در طول زمان تغییر می‌کند و امکان جعل آن بیشتر از اثر انگشت و عنبیه چشم است اما با توجه به این که امضا در کشورها و فرهنگ‌های مختلف از سندی و مقبولیت زیادی برخوردار است و با سرعت مناسبی قابل پردازش است، لذا استفاده از آن برای تأیید هویت افراد جایگاه ویژه‌ای دارد [۲].

امضا به دو گروه کلی، امضای برخط و امضای برون خط تقسیم می‌شود. در امضای برون خط فقط تصویر امضا و اطلاعات مکانی وجود دارد در حالی که امضای برخط، علاوه بر اطلاعات مکانی، اطلاعات زمانی مسیر امضا را نیز شامل می‌شود [۳]. جعل ویژگی‌های دینامیکی امضا سخت‌تر از جعل ویژگی‌های مکانی آن است به‌همین دلیل امضای برخط نرخ خطای تأیید کمتری دارد.

روش‌های تأیید امضای برخط به دو گروه پارامتری و تابعی تقسیم

1. Reference
2. Test
3. Segment
4. Hidden Markov Model
5. Dynamic Time Warping
6. Extremum
7. Dynamic Programming

این مقاله در تاریخ ۳۰ دی ماه ۱۳۸۶ دریافت و در تاریخ ۱۹ تیر ماه ۱۳۸۷ بازنگری شد.

مرتضی ولیزاده، بخش مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، کدپستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵ (email: valizadeh@modares.ac.ir).

احسان‌اله کبیر، بخش مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، کدپستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵ (email: kabir@modares.ac.ir).

این مقاله از ۶ بخش تشکیل شده است. در بخش ۲ پیش پردازش‌های استفاده شده و استخراج ویژگی‌ها شرح داده می‌شود. در بخش ۳ محاسبه شباهت بین دو امضا در حوزه زمان و حوزه تبدیل موجک بحث می‌شود. بخش ۴ به آموزش الگوریتم تأیید و تصمیم‌گیری اختصاص داده شده است. در بخش ۵ سیستم تأیید امضا ارزیابی می‌شود و بخش ۶ به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- پیش پردازش و استخراج ویژگی

در مرحله پیش‌پردازش، اندازه امضاها نرمالیزه شده و چرخش بین دو امضا حذف می‌شود.

۲-۱ نرمالیزه کردن اندازه امضا

افراد معمولاً اندازه امضای خود را با توجه به فضایی که در اختیار دارند تغییر می‌دهند. اگر در سیستم تأیید امضا، صفحه‌های رقومی‌کننده اندازه‌های متفاوتی داشته باشند، اندازه امضا باید نرمالیزه شود. برای این منظور سیگنال‌های x و y امضا با (۱) نرمالیزه می‌شوند

$$x(n) = \frac{x^*(n) - m(x)}{x_{\max}^* - x_{\min}^*} \quad (1)$$

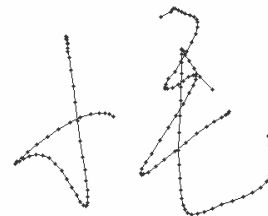
$$y(n) = \frac{y^*(n) - m(y)}{y_{\max}^* - y_{\min}^*}$$

که در آن $x^*(n)$ و $y^*(n)$ مختصات قلم در لحظه n و $x(n)$ و $y(n)$ مقادیر نرمالیزه شده هستند. x_{\max}^* ، x_{\min}^* و $m(x)$ به ترتیب بیشینه، کمینه و میانگین سیگنال x و y_{\max}^* ، y_{\min}^* و $m(y)$ به ترتیب بیشینه، کمینه و میانگین سیگنال y هستند. در شکل ۱ یک نمونه امضا و سیگنال‌های x و y آن نشان داده شده است.

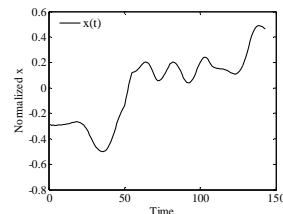
۲-۲ هم‌راستا کردن دو امضا با استفاده از DTW

مختصات قطبی

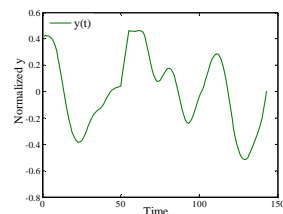
قبل از استخراج ویژگی و محاسبه شباهت بین دو امضا، به منظور کاهش تغییرات درون‌کلاسی، زاویه چرخش بین دو امضا تعیین و حذف می‌شود. در اکثر روش‌های حذف چرخش بین دو امضا، یک ویژگی پارامتری برای توصیف زاویه چرخش بین دو امضا استخراج و از آن ویژگی برای حذف چرخش استفاده می‌کنند [۷] ولی این روش‌ها برای زوایای چرخش بیشتر از ۲۰ درجه خطای زیادی دارند. در این تحقیق الگوریتم جدیدی برای حذف چرخش بین دو امضا ارائه شده است. با انتقال امضا به مختصات قطبی، سیگنال‌های r و θ امضا را توصیف می‌کنند. اگر امضا را در مختصات قطبی به اندازه α بچرخانیم تابع r بدون تغییر باقی می‌ماند و فقط تابع θ به اندازه α یا $2\pi - \alpha$ جابه‌جا می‌شود. از این خاصیت برای حذف چرخش استفاده می‌کنیم. با توجه به عدم تطابق زمانی یک به یک بین دو امضا، نمی‌توان آنها را به صورت نقطه به نقطه مقایسه کرد. به همین منظور ابتدا تطابق بین توابع r دو امضا را با استفاده از الگوریتم DTW به دست می‌آوریم و از مسیر تطابق به دست آمده برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌های θ استفاده می‌کنیم. چگونگی یافتن تطابق و یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها در بخش ۳ به طور مفصل بحث می‌شود. پس از یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌های θ دو امضا، از اختلاف آنها برای یافتن زاویه چرخش استفاده می‌کنیم. برای این منظور فراوانی اختلاف سیگنال‌های θ دو امضا را در بازه‌های ۵ درجه‌ای پیدا می‌کنیم. بازه‌های که به ازای آن نمودار فراوانی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: (الف) شکل یک نمونه امضا، (ب) سیگنال x مربوط به شکل و (ج) سیگنال y مربوط به شکل.

چون فقط از نقاط فرینه برای یافتن نقاط متناظر دو امضا استفاده می‌شود و در [۱۰] روشی بر مبنای DTW برای منطبق کردن دو سیگنال بر روی هم پیشنهاد شده است، این روش تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی را کاهش می‌دهد.

در این مقاله روش جدیدی بر مبنای تطابق نقاط فرینه، برای یافتن نقاط متناظر دو امضا و یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها ارائه شده است. این روش با این که نقاط متناظر دو امضا را با دقت خوبی بر روی هم منطبق می‌کند، تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی را حفظ می‌کند و باعث بهبود دقت سیستم تأیید امضا می‌شود. همچنین در این تحقیق برای افزایش تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی، شباهت بین جزئیات سیگنال‌ها در حوزه DWT^1 و SWT^2 بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از جزئیات سیگنال در حوزه SWT نسبت به DWT برتری دارد. لازم به ذکر است که قبلاً در [۱۱] با استفاده از باند جزئیات سیگنال‌های مسیر حرکت و باند تقریب سیگنال زاویه حرکت قلم در حوزه DWT ، شباهت بین دو امضا محاسبه شده و در [۱۲] چندین ویژگی پارامتری از باند جزئیات و باند تقریب سیگنال‌ها در حوزه DWT استخراج و از این ویژگی‌ها برای تأیید امضا استفاده شده بود.

برای تأیید یا رد امضای ورودی، شباهت آن با امضاهای اصلی محاسبه شده و با یک حد آستانه مقایسه می‌شود. روش‌های انتخاب حد آستانه برای تأیید یا رد امضا به دو گروه کلی، حد آستانه وابسته به فرد و حد آستانه مستقل از فرد تقسیم می‌شود [۱۳]. در حد آستانه وابسته به فرد برای امضاهای هر فرد یک حد آستانه تعیین می‌شود در حالی که در حد آستانه مستقل از فرد، برای امضاهای همه افراد یک حد آستانه مشترک تعیین می‌شود. در این تحقیق از حد آستانه وابسته به فرد استفاده می‌شود.

1. Discrete Wavelet Transform
2. Stationary Wavelet Transform

۲-۳ استخراج ویژگی

در بیشتر مراجع برای تأیید امضای برخط به روش تابعی از سیگنال‌های x ، y ، v_x و v_y ، فشار و زاویه حرکت قلم به عنوان ویژگی‌های تابعی استفاده می‌شود. در این تحقیق از چهار ویژگی x ، y ، v_x و v_y استفاده می‌کنیم. سیگنال‌های x و y مستقیماً به وسیله صفحه رقومی کننده ثبت و پس از پیش‌پردازش استفاده می‌شوند و v_x و v_y با استفاده از (۳) به دست می‌آیند که از [۷] الهام گرفته شده است

$$v_x(n) = \sum_{\tau=1}^{n-1} \frac{x(n+\tau) - x(n-\tau)}{\tau} \quad (3)$$

$$v_y(n) = \sum_{\tau=1}^{n-1} \frac{y(n+\tau) - y(n-\tau)}{\tau}$$

v_x و v_y به ترتیب بیانگر سرعت در جهت x و y هستند.

۳- محاسبه شباهت بین دو امضا

برای محاسبه شباهت بین دو امضا از رگرسیون توسعه یافته [۱۰] استفاده می‌کنیم. مزیت این روش آن است که به طور مستقیم میزان شباهت دو توالی چندبعدی را نشان می‌دهد ولی با استفاده از آن فقط می‌توان شباهت بین سیگنال‌هایی با طول زمانی یکسان را محاسبه کرد. اگر طول زمانی سیگنال‌ها متفاوت باشد، باید به نحوی طول زمانی آنها یکسان شود که نقاط متناظر دو سیگنال بر روی هم منطبق شوند. برای یافتن نقاط متناظر دو سیگنال از الگوریتم DTW استفاده می‌شود [۱۴].

۳-۱ یافتن نقاط متناظر دو سیگنال با DTW

فرض کنید دو سیگنال زمانی داریم که طول سیگنال x_1 برابر با n و طول سیگنال x_2 برابر با m است. برای یافتن نقاط متناظر دو سیگنال به وسیله الگوریتم پیچش زمانی پویا، ابتدا ماتریس d به ابعاد $n \times m$ را تشکیل می‌دهیم که عنصر (i, j) این ماتریس با (۴) تعیین می‌شود

$$d(i, j) = |x_{1,i} - x_{2,j}| \quad (4)$$

که در آن $x_{1,i}$ و $x_{2,j}$ به ترتیب بیانگر i امین عنصر سیگنال x_1 و j امین عنصر سیگنال x_2 هستند.

برای پیدا کردن نقاط متناظر دو سیگنال، مسیری را پیدا می‌کنیم که حاصل جمع درایه‌های ماتریس d از $(1,1)$ تا (m,n) روی این مسیر کمینه شود. به مسیری که چنین ویژگی داشته باشد مسیر پیچش گفته می‌شود. مسیر پیچش مجموعه‌ای به هم پیوسته از عناصر ماتریس d است و جزئیات تطابق محور زمانی سیگنال‌های x_1 و x_2 را بیان می‌کند. مسیر پیچش را با W_1 و W_2 نشان می‌دهیم. اگر این مسیر در k امین گام از درایه $d(i, j)$ عبور کند با (۵) بیان می‌شود

$$W_{1,k} = i \quad 0 < k \leq K \quad (5)$$

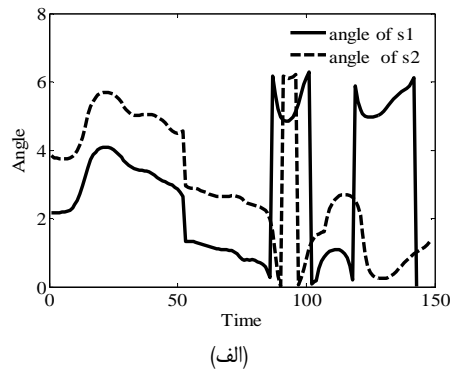
$$W_{2,k} = j \quad \max(m, n) < K < m + n - 1$$

$W_{1,k}$ و $W_{2,k}$ بیانگر k امین درایه مسیر پیچش هستند و K نشان‌دهنده بیشینه مقدار طول مسیر است.

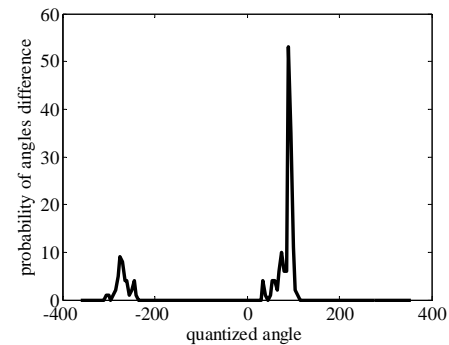
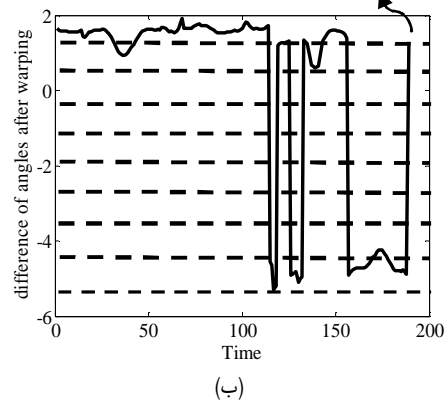
مسیر بهینه W ، مسیری است که (۶) را کمینه کند

$$DTW(x_1, x_2) = \min \sqrt{\sum_{k=1}^K d(W_{1,k}, W_{2,k})} \quad (6)$$

از الگوریتم DP، (۷) برای یافتن کمترین فاصله کلی بین دو سیگنال و نقاط متناظر بین آنها استفاده می‌شود



فراوانی در این بازه بیشینه است



شکل ۲: (الف) سیگنال‌های θ دو امضا با ۹۰ درجه چرخش نسبت به هم، (ب) اختلاف سیگنال‌های θ دو امضا و فراوانی آنها در هر بازه و (ج) فراوانی اختلاف سیگنال‌های θ دو امضا.

بیشینه است، زاویه چرخش را مشخص می‌کند. در شکل‌های ۲-الف، ۲-ب و ۲-ج به ترتیب سیگنال‌های θ دو امضا، اختلاف آنها و فراوانی اختلاف آنها نشان داده شده است. این امضاها ۹۰ درجه نسبت به هم چرخش دارند.

برای به دست آوردن نمودار فراوانی، مقدار اختلاف دو نمودار در هر لحظه به عنوان یک نمونه در نظر گرفته می‌شود و فراوانی آنها در بازه‌های ۵ درجه‌ای محاسبه می‌شود. برای مثال در شکل ۲-ب، فراوانی در بازه‌های ۳۶ درجه‌ای قابل مشاهده است. دلیل انتخاب محدوده‌های ۵ درجه‌ای این است که با این انتخاب، حداکثر خطای زاویه چرخش تعیین شده، ۲/۵ درجه است و نتایج تجربی نشان می‌دهد که حساسیت سیستم تأیید امضا به این میزان خطا قابل چشم‌پوشی است.

برای حذف چرخش، امضای s_2 را با (۲) به اندازه $-\alpha$ می‌چرخانیم

$$\begin{bmatrix} x(n) \\ y(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & -\sin(-\alpha) \\ \sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^*(n) \\ y^*(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

فرینه n ام از x_1 را با $e(1, n)$ و فرینه n ام از x_r را با $e(r, n)$ نشان می‌دهیم.

گام دوم: پیدا کردن تطابق بهینه بین نقاط فرینه دو سیگنال

با توجه به این که می‌خواهیم از تطابق نقاط فرینه برای یکسان‌سازی طول زمانی دو سیگنال استفاده کنیم، یک تطابق اشتباه می‌تواند در مقایسه دو سیگنال مشکل اساسی ایجاد کند. بنابراین پیدا کردن تطابق بین فرینه‌های دو سیگنال از اهمیت زیادی برخوردار است.

برای یافتن تطابق نقاط فرینه به صورت زیر عمل می‌کنیم:

(۱) با استفاده از الگوریتم DTW مسیر پیچش سیگنال‌های x_1 و x_r را یافته و با W_1 و W_r نشان می‌دهیم.

(۲) روی W_1 فرینه‌های x_1 را یافته و برای هر کدام از آنها یک محدوده مجاز تطابق تعریف می‌کنیم، محدوده مجاز تطابق مربوط به فرینه n ام را با $D(n)$ نمایش می‌دهیم که شامل فرینه n ام، ۳ نمونه زمانی قبل و ۳ نمونه زمانی بعد از آن می‌باشد.

(۳) روی W_r فرینه‌های x_r را پیدا می‌کنیم، فرینه‌هایی که خارج از نواحی مجاز تطابق قرار گرفته‌اند، حذف می‌شوند و اگر هیچ کدام از فرینه‌های x_r در داخل ناحیه تطابق $D(n)$ قرار نگیرد، فرینه n ام x_1 حذف می‌شود.

(۴) اگر $e(r, m)$ در ناحیه $D(n)$ قرار داشته باشد و نوع فرینه‌های $e(1, n)$ و $e(r, m)$ از لحاظ \max یا \min یکسان باشد، به عنوان فرینه‌های منطبق بر هم انتخاب می‌شوند در غیر این صورت به عنوان نقاط فرینه بی‌اهمیت حذف می‌شوند.

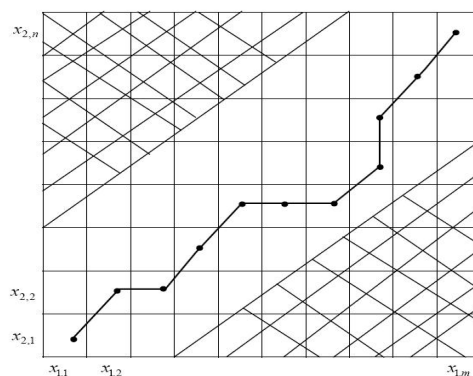
برای توضیح بیشتر، عملکرد این روش را با یک مثال عددی نشان می‌دهیم. زمان وقوع فرینه‌های x_1 و x_r به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است و جدول ۳ قسمتی از مسیر پیچش به دست آمده توسط DTW و محدوده مجاز تطابق تعریف شده را نشان می‌دهد. در این جدول خانه‌های با مقادیر ۸ تا ۱۴ روی مسیر W_1 محدوده مجاز تطابق $D(1)$ را تشکیل می‌دهند که متناظر آنها برای W_r خانه‌های با مقادیر ۸ تا ۱۲ هستند و دو خانه با مقادیر ۱۱ و ۱۰ در ردیف اول و دوم که در ناحیه تطابق قرار دارند به عنوان فرینه‌های منطبق بر هم در نظر گرفته می‌شوند.

در شکل ۴ تطابق فرینه‌های x_1 و x_r با روش پیشنهادی نشان داده شده است.

گام سوم: یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها

برای یکسان‌سازی طول زمانی دو سیگنال، فرینه‌های منطبق بر هم را در داخل آرایه C به ابعاد $2 \times N$ قرار می‌دهیم که N برابر با تعداد فرینه‌های منطبق بر هم است. زوج $C(1, n)$ و $C(r, n)$ ، n امین فرینه منطبق بر هم را نشان می‌دهند. علاوه بر نقاط فرینه منطبق بر هم، نقطه ابتدایی و انتهایی دو سیگنال را نیز بر هم منطبق می‌کنیم. فرض کنید طول زمانی سیگنال x_1 برابر با p و طول زمانی سیگنال x_r برابر با q باشد. برای منطبق کردن دو سیگنال بر روی هم، محور زمانی x_1 را ثابت نگاه می‌داریم و فقط محور زمانی x_r را طبق (۹) تغییر می‌دهیم که در آن $[x]$ نشان‌دهنده جزء صحیح x است [۱۵].

$$n' = \begin{cases} 1 + \left\lfloor \frac{C(1,1)}{C(r,1)} \times (n-1) \right\rfloor & , \quad 0 < n < C(r,1) \\ C(1,m) + \left\lfloor \frac{C(1,m+1) - C(1,m)}{C(r,m+1) - C(r,m)} \times (n - C(1,m)) \right\rfloor & , \quad C(r,m) \leq n < C(r,m+1) \\ C(1,N) + \left\lfloor \frac{p - C(1,N)}{q - C(r,N)} \times (n - C(r,N)) \right\rfloor & , \quad C(r,N) \leq n \leq q \end{cases} \quad (9)$$



شکل ۳: مسیر پیچش سیگنال x_1 و x_r .

$$\gamma(i, j) = d(x_{1,i}, x_{r,j}) + \min \begin{cases} \gamma(i-1, j-1) \\ \gamma(i-1, j) \\ \gamma(i, j-1) \end{cases} \quad (7)$$

که در آن $\gamma(n, m)$ فاصله کلی دو سیگنال را نشان می‌دهد [۱۴]. بنابراین با استفاده از DTW مسیر پیچش بین دو سیگنال به دست می‌آید و به وسیله این مسیر، طول زمانی سیگنال‌ها هم‌اندازه می‌شود. شکل ۳ مسیر پیچش سیگنال‌های x_1 و x_r را نشان می‌دهد. با توجه به این که احتمال دور بودن مسیر پیچش از قطر اصلی ماتریس d خیلی کم است، برای یافتن مسیر پیچش، نواحی دور از قطر اصلی ماتریس d جستجو نمی‌شوند. این نواحی در شکل ۳ به صورت هاشور خورده نشان داده شده است.

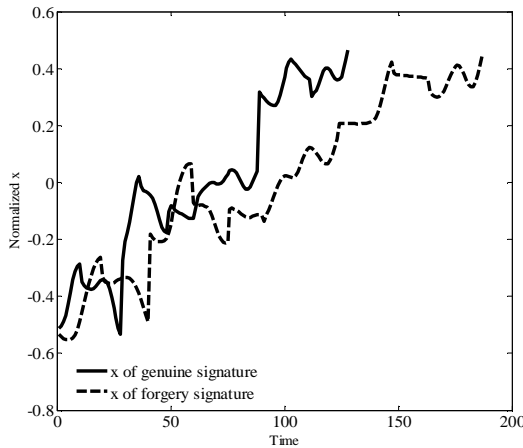
۲-۳ روش پیشنهادی برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها

در [۱۰] برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها به صورت زیر عمل شده است. اگر $x_{r,i}$ در سیگنال x_1 بر روی $k > 1$ نقطه از سیگنال x_r منطبق شود $k-1$ مرتبه تکرار می‌شود و اگر $x_{r,i}$ بر روی k نقطه از سیگنال x_1 منطبق شود، به همین روش توسعه داده می‌شود. با این الگوریتم دو سیگنال با طول زمانی یکسان به دست می‌آید که نقاط متناظر آنها بر روی هم منطبق شده است ولی این الگوریتم باعث کاهش تمایز امضاهای اصلی و جعلی می‌شود. در این مقاله برای حفظ تمایز بین امضاهای اصلی و امضاهای جعلی، روشی بر مبنای تطابق نقاط فرینه برای یکسان‌سازی طول زمانی ارائه می‌شود. این روش در سه گام انجام می‌شود که در گام اول نقاط فرینه سیگنال‌ها استخراج می‌شود، در گام دوم تطابق بین نقاط فرینه دو سیگنال پیدا می‌شود و در گام سوم با استفاده از تطابق نقاط فرینه طول زمانی سیگنال‌ها یکسان می‌شود.

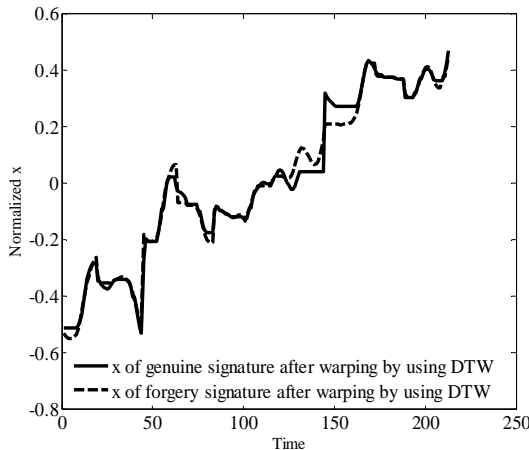
گام اول: استخراج نقاط فرینه

برای یافتن نقاط فرینه دو سیگنال، نقاط عبور از صفر مشتق آنها را پیدا کرده و با (۸) نوع نقاط فرینه را تعیین می‌کنیم

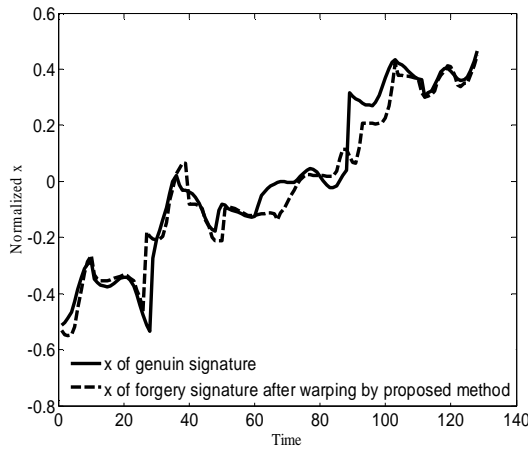
$$x'(n) \times x'(n-1) < 0 \begin{cases} x'(n) < 0 \Rightarrow x(n) = \max \\ x'(n) > 0 \Rightarrow x(n) = \min \end{cases} \quad (8)$$



(الف)



(ب)

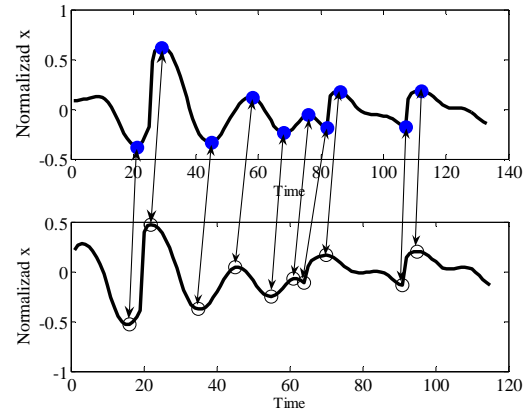


(ج)

شکل ۵: (الف) سیگنال‌های x امضای اصلی و امضای جعلی، (ب) یکسان‌سازی طول زمانی به روش DTW و (ج) یکسان‌سازی طول زمانی به روش پیشنهادی.

را مقایسه کرد [۱۲]. الگوریتم تأیید امضای پیشنهادی در حوزه تبدیل موجک، فقط در بخش محاسبه شباهت با الگوریتم پیشنهادی در حوزه زمان متفاوت است. در این الگوریتم به‌جای استفاده از سیگنال‌های x ، y ، v_x و v_y از جزئیات آنها استفاده می‌شود. برای به‌دست آوردن Di جزئیات مرتبه i ام یک سیگنال به ترتیب زیر عمل می‌شود.

ابتدا سیگنال به حوزه تبدیل موجک منتقل می‌شود. سپس تمام ضرایب به‌جز ضرایب جزئیات تبدیل موجک پس از i مرتبه تجزیه، صفر می‌شوند و با استفاده از این ضرایب، سیگنال در حوزه زمان بازسازی می‌شود. سیگنال بازسازی‌شده جزئیات مرتبه i ام سیگنال اصلی نامیده می‌شود. نکته مهمی که باید به آن اشاره شود، این است که جزئیات سیگنال‌ها به



شکل ۴: تطابق فرینه‌های x_p و x .

جدول ۱: زمان وقوع فرینه‌های روی سیگنال x_p .

Extremum (x_p)	۱۱	۱۷	۲۴	۳۳	۴۱	۴۵
Type	min	max	min	max	min	max

جدول ۲: زمان وقوع فرینه‌ها روی سیگنال x .

Extremum (x)	۱۰	۱۵	۲۲	۳۱	۳۸	۴۲
Type	min	max	min	max	min	max

جدول ۳: قسمتی از تطابق محور زمانی سیگنال‌های x_p و x .

W_p	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
W_x	۷	۸	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳

در شکل ۵-الف سیگنال‌های x یک نمونه امضای اصلی و امضای جعلی نشان داده شده است و در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج به ترتیب نتایج یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها به روش DTW [۱۰] و روش پیشنهادی نشان داده شده است.

مقایسه شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش [۱۰] تمایز امضای اصلی و امضای جعلی را افزایش می‌دهد.

۳-۳ محاسبه شباهت در حوزه زمان

پس از یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌های متناظر دو امضا، x ، y ، v_x و v_y یکی از امضاها را در ماتریس g و سیگنال‌های متناظر امضای دیگر را در ماتریس f قرار می‌دهیم و با (۱۰) شباهت بین دو امضا را محاسبه می‌کنیم [۱۰].

$$\text{similarity} = \frac{(\sum_{j=1}^M (\sum_{i=1}^n (g_{ji} - \overline{G_j})(f_{ji} - \overline{F_j})))^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n (g_{ji} - \overline{G_j})^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n (f_{ji} - \overline{F_j})^2} \quad (10)$$

که در آن $M = 4$ ، g و f ماتریس‌هایی با ابعاد $4 \times n$ هستند، $\overline{G_j}$ و $\overline{F_j}$ میانگین متوسط بعد از j ام توالی‌های g و f است، n نشان‌دهنده طول زمانی امضای ذخیره‌شده در ماتریس g است و similarity بیانگر شباهت بین دو امضا است.

۳-۴ محاسبه شباهت در حوزه تبدیل موجک

تبدیل موجک یک ابزار قوی برای مقایسه سیگنال‌ها در طیف‌های فرکانسی مختلف است و با استفاده از آن می‌توان جزئیات مختلف دو امضا

جدول ۴: نرخ خطا برای توابع و جزئیات انتخابی با تبدیل DWT.

سیگنال	تابع موجک	جزئیات	EER (%)
x	Db1	D4 + D3	۱۸
y	Db1	D4 + D3	۱۴٫۶
v_x	Db1	D4 + D3	۱۴
v_y	Db2	D4 + D3	۱۳

جدول ۵: نرخ خطا برای توابع و جزئیات انتخابی با تبدیل SWT.

سیگنال	تابع موجک	جزئیات	EER (%)
x	Db1	D4 + D3	۱۴
y	Db1	D4 + D3	۱۲٫۶
v_x	Db1	D3	۱۲
v_y	Db1	D3	۸

۳-۲- محاسبه شباهت

برای محاسبه شباهت بین دو امضا در حوزه تبدیل موجک، با استفاده از (۱۰) و جزئیات انتخابی در جدول‌های ۴ و ۵، شباهت بین دو امضا را محاسبه می‌کنیم.

۴- آموزش سیستم تأیید امضا و تصمیم‌گیری

در بعضی روش‌های تأیید امضا مانند روش‌های بر مبنای مدل مخفی مارکوف [۷] و روش‌های پارامتری، در مرحله آموزش برای امضاهای هر نفر یک مدل استخراج می‌شود ولی در این تحقیق هدف از آموزش، تعیین حد آستانه برای تأیید یا رد امضاهاست. برای این منظور در مرحله آموزش از ۵ امضای اصلی هر نفر استفاده می‌شود و شباهت بین این امضاها دوبه‌دو محاسبه و از متوسط ۱۰ شباهت به‌دست آمده برای تعیین مرز تصمیم استفاده می‌شود. اگر شباهت بین امضاهای آموزشی S_q و S_p متعلق به فرد i با $similarity(p, q)$ نشان داده شود، مرز تصمیم مربوط به امضاهای آن فرد با (۱۱) تعیین می‌شود

$$T_i = \alpha \times ms_i$$

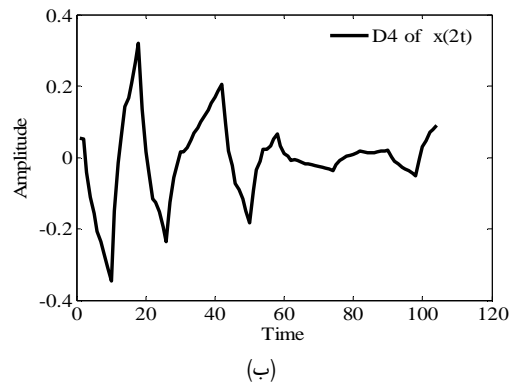
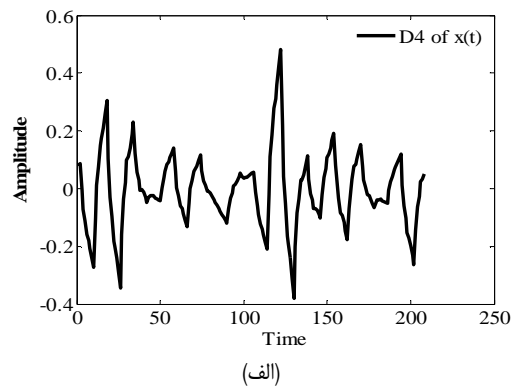
$$ms_i = \frac{\sum_{p=1}^5 \sum_{q=p+1}^5 similarity(p, q)}{10} \quad (11)$$

در (۱۱) T_i مرز تصمیم امضاهای فرد i ام و α یک ضریب تجربی است که با توجه به میزان امنیت مورد نیاز، از روی نمودارهای خطا تعیین می‌شود. در مرحله تصمیم‌گیری، شباهت امضای ورودی با هر ۵ امضای مرحله آموزش محاسبه شده و میانگین ۳ شباهت بزرگتر، به‌عنوان معیار شباهت امضای ورودی با امضاهای آموزشی در نظر گرفته می‌شود. این معیار به‌صورت تجربی تعیین شده است. شباهت امضای ورودی با امضاهای آموزشی فرد i ام را با $Score_i$ نمایش می‌دهیم. چگونگی مقایسه امضاها در مرحله آموزش و تصمیم‌گیری به‌ترتیب در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نشان داده شده است.

برای تأیید یا رد امضای ورودی که ادعا می‌شود متعلق به فرد i ام است، اگر شرط $Score_i > T_i$ برقرار باشد، امضای ورودی تأیید و در غیر این صورت رد می‌شود.

۵- ارزیابی سیستم تأیید امضا

برای ارزیابی سیستم تأیید امضا دو نوع خطا تعریف می‌شود. خطای

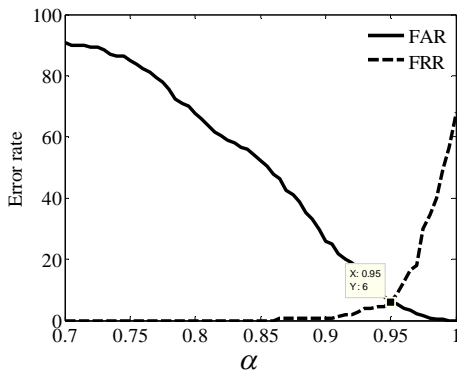
شکل ۶: (الف) جزئیات D4 سیگنال $x(t)$ و (ب) جزئیات D4 سیگنال $x(2t)$.

طول زمانی آنها خیلی وابسته است. این موضوع به وضوح در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. در شکل ۶-الف جزئیات D4 سیگنال $x(t)$ و در شکل ۶-ب جزئیات D4 سیگنال $x(2t)$ نشان داده شده است. با این که $x(2t)$ با تغییر مقیاس محور زمانی سیگنال $x(t)$ به‌دست می‌آید ولی جزئیات D4 سیگنال $x(2t)$ با تغییر مقیاس محور زمانی جزئیات سیگنال $x(t)$ به‌دست نمی‌آید و این موضوع بیانگر وابستگی جزئیات سیگنال‌ها به طول زمانی آنهاست. بنابراین یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها با استفاده از تطابق نقاط فرینه در حوزه زمان انجام می‌شود [۱۶].

۳-۴-۱ انتخاب تابع موجک و مرتبه جزئیات مناسب

برای انتخاب تابع موجک و مرتبه جزئیات مناسب، تبدیل‌های موجک DWT و SWT را جداگانه بررسی می‌کنیم. با توجه به گوناگونی شکل سیگنال‌های امضاها، روش کلی برای انتخاب تابع موجک و مرتبه جزئیات مناسب ارائه نشده است و به‌صورت تجربی تعیین می‌شوند. برای انتخاب تابع موجک و جزئیات مناسب برای هر یک از سیگنال‌های x ، y ، v_x و v_y برای جزئیات ۵ سطح تجزیه و توابع موجک دابیشیز، کویفلتز^۲، سیملتز^۳ و بای اورتوگونال^۴، EER^۵ محاسبه می‌شود و برای هر یک از سیگنال‌ها، تابع موجک و مرتبه جزئیات با کمترین خطا انتخاب می‌شود [۱۶]. EER نشان‌دهنده میزان خطای سیستم تأیید امضا است که در بخش ۵ به‌طور مفصل بحث می‌شود. توابع موجک و مرتبه جزئیات با کمترین خطا برای سیگنال‌های مختلف امضا و تبدیل‌های DWT و SWT به‌ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است [۱۷].

1. Daubechies
2. Coiflets
3. Symlets
4. Biorthogonal
5. Equal Error Rate



شکل ۸: نمودارهای خطا برای مقادیر مختلف α در حوزه SWT.

Wang Gang

Wang Gang

(الف)

Wang Gang

(ب)

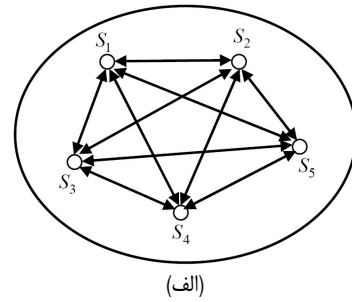
شکل ۹: (الف) دو نمونه امضای اصلی و (ب) امضای جعلی.

۲-۵ نتایج محاسبه شباهت در حوزه زمان و موجک

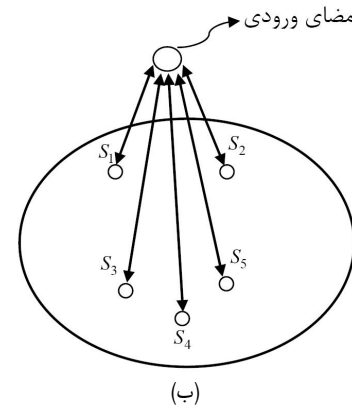
برای مقایسه الگوریتم تأیید امضای پیشنهادی در حوزه زمان و حوزه تبدیل موجک و الگوریتم [۱۰]، این سیستم‌های تأیید امضا بر روی مجموعه امضاهای SVC۲۰۰۴ آزمایش شده و نتایج آنها در جدول ۶ آورده شده است.

با در نظر گرفتن این که تفاوت الگوریتم [۱۰] و الگوریتم پیشنهادی در حوزه زمان فقط در روش یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌هاست می‌توان نتیجه گرفت که بهبود نرخ خطای تأیید امضا نیز از آن تفاوت ناشی می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها نرخ خطا را ۳۴٪ نسبت به روش [۱۰] بهبود می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که با استفاده از حوزه SWT خطای تأیید نسبت به حوزه DWT و زمان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند. نمودار خطاهای سیستم تأیید امضا در حوزه SWT در شکل ۸ نشان داده شده است.

با محاسبه شباهت در حوزه SWT برای امضاهایی که تغییرات درون‌کلاسی خیلی زیادی دارند، بهبود زیادی حاصل نمی‌شود ولی برای امضاهایی که تغییرات درون‌کلاسی کمی دارند خیلی مناسب است. شکل‌های ۹-الف و ۹-ب به ترتیب دو نمونه امضای اصلی و یک نمونه جعل شده آن را نشان می‌دهند. امضاهای اصلی تغییرات درون‌کلاسی ناچیزی دارند و امضای جعلی شکل ۹-ب که به‌وسیله الگوریتم‌های حوزه زمان به اشتباه تأیید می‌شود با محاسبه شباهت در حوزه SWT به درستی رد می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۷: (الف) آموزش سیستم تأیید و (ب) تصمیم‌گیری.

جدول ۶: مقایسه نرخ خطا.

α	EER (%)	سیستم تأیید امضا
۰.۹۸	۱۴/۲۲	مرجع [۱۰]
۰.۹۶	۹/۳۳	الگوریتم پیشنهادی در حوزه زمان
۰.۹۳	۹	الگوریتم پیشنهادی در حوزه DWT
۰.۹۵	۶	الگوریتم پیشنهادی در حوزه SWT

نوع اول که با FAR^۱ نشان داده می‌شود و بیانگر نرخ پذیرش امضاهای جعلی است و خطای نوع دوم که با FRR^۲ نشان داده می‌شود و بیانگر نرخ رد امضاهای اصلی است. این دو خطا با هم نسبت عکس دارند یعنی اگر مرز تصمیم به‌گونه‌ای تغییر کند که FAR کاهش پیدا کند، FRR افزایش پیدا می‌کند. بنابراین نمودارهای FAR و FRR با تغییر پارامتر α رسم و محل تقاطع دو نمودار که EER نامیده می‌شود، برای ارزیابی سیستم تأیید امضا استفاده می‌شود. با توجه به این که در این تحقیق برای همه امضاها، پارامتر α یکسان در نظر گرفته می‌شود، برای سیستم تأیید یک نرخ خطا گزارش می‌شود و تحت عنوان ارزیابی با آستانه مشترک برای همه کاربرها شناخته شده است.

۱-۵ مجموعه امضاها

در این تحقیق از مجموعه امضاهای اولین مسابقه بین‌المللی تأیید امضا SVC۲۰۰۴ استفاده شده که این مجموعه از امضاهای ۴۰ نفر تشکیل می‌شود. برای هر نفر ۲۰ امضای اصلی و ۲۰ امضای جعلی از ۴ نفر جمع‌آوری شده است. این مجموعه با عنوان مجموعه آموزش در سایت اینترنتی این مسابقه [۱۸] در اختیار عموم قرار داده شده است. از ۵ امضای اصلی برای آموزش سیستم تأیید و از ۱۰ امضای اصلی و ۲۰ امضای جعلی (طبق شرایط مسابقه) برای ارزیابی سیستم تأیید امضا استفاده شده است.

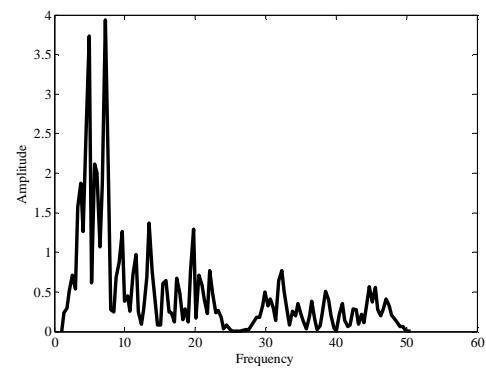
1. False Acceptance Rate

2. False Rejection Rate

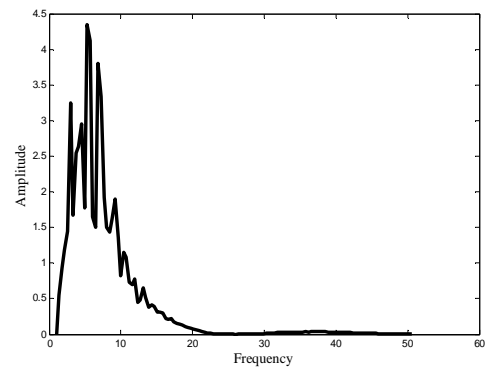
مشترک برای همه کاربرها (پارامتر α یکسان برای همه کاربرها)، سیستم تأیید امضای پیشنهادی در حوزه SWT برای امضاهای جعلی حرفه‌ای در مقایسه با تیم‌های شرکت‌کننده در اولین مسابقه بین‌المللی تأیید امضا در رتبه دوم قرار می‌گیرد و برای امضاهای جعلی تصادفی خطای تأیید وجود ندارد و در رتبه اول قرار می‌گیرد.

مراجع

- [1] G. K. Gupta, R. Joyce, "Using position extrema points to capture shape in on-line handwritten signature verification," *Pattern Recognition*, vol. 40, no. 10, pp. 2811-2817, Oct. 2007.
- [2] A. Kholmatov and B. Yanikoglu, "Identity authentication using improved online Signature verification method," *Pattern Recognition*, vol. 26, no. 15, pp. 2400-2408, No. 2005.
- [3] L. Nanni, "Experimental comparison of one-class classifiers for online signature verification," *Neurocomputing*, vol. 69, no. 7-9, pp. 869-873, Mar. 2006.
- [4] L. Lee, T. Berger, and E. Aviczer, "Reliable on-line human signature verification systems," *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intel.*, vol. 18, no. 6, pp. 643-647, Jun. 1996.
- [5] R. Plamondon and G. Lorette, "Automatic signature verification and writer identification the state of the art," *Pattern Recognition*, vol. 22, no. 2, pp. 107-131, 1989.
- [6] H. Lei and V. Govindaraju, "A comparative study on the consistency of features in on-line signature verification," *Pattern Recognition Letters*, vol. 26, no. 15, pp. 2483-2489, Nov. 2005.
- [7] J. Fierrez, J. Ortega -Garcia, D. Ramos, and J. Gonzalez, "HMM-based on-line signature verification: feature extraction and signature modeling," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, no. 16, pp. 2325-2334, 1 Dec. 2007.
- [8] J. Lee, H. Yoon, J. Sob, B. Chon, and Y. K. Chong, "Using geometric extrema for segment-to-segment characteristics comparison in online signature verification," *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 1, pp. 93-103, Jan. 2004.
- [9] H. Feng and C. Wah, "Online signature verification using a new extreme points warping technique," *Pattern Recognition*, vol. 24, no. 16, pp. 2943-2951, Dec. 2003.
- [10] H. Lei, S. Palla, and V. Govindaraju, "ER2: an intuitive similarity measure for on-line signature verification," in *Proc. 9th Int. Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition. IWFHR9*, pp. 191-195, Tokyo, 26-29 Oct. 2004.
- [11] I. Nakanishi, H. Sakamoto, Y. Itoh, and Y. Fukui, "Multi-matcher online signature verification system in DWT domain," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 2, pp. 965-968, Mar. 2005.
- [12] A. da Silva and D. S. de Freitas, "Wavelet-based compared to function - based on - line signature verification," in *Proc. 15th Brazilian Symposium on Computer Diagrams and Image Processing, IBGRAP'02*, pp. 218-225, Fortaleza-CE, Brazil, 7-10 Oct. 2002.
- [13] A. Jain, F. Griess, and S. Connell, "On-line signature verification," *Pattern Recognition*, vol. 35, no. 12, pp. 2963-2972, Dec. 2002.
- [14] C. E. Keog, "Making time-series classification more accurate using learned constraints," in *Proc. Intl. Conf. on Data Mining*, pp. 11-22, Lake Buena Vista, Florida, US, 22-24, Aug. 2004.
- [15] م. ولی‌زاده و ا. کبیر، "تطابق فرینه‌های سیگنال‌های امضاهای برخط به روش DTW برای حفظ تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی،" *اولین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و سیستم‌های هوشمند*، جلد ۱، صص. ۷۱۲-۷۰۷، مشهد، ۹-۷ شهریور ۱۳۸۶.
- [16] م. ولی‌زاده، استفاده از رگرسیون توسعه‌یافته در حوزه تبدیل موجک برای تأیید امضای برخط، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، صص. ۶۳-۵۵، ۱۳۸۶.
- [17] م. ولی‌زاده و ا. کبیر، "استفاده از تبدیل موجک برای بهبود سیستم تأیید امضای برخط،" *سیزدهمین کنفرانس سالانه کامپیوتر ایران*، کیش، ۲۱-۱۹ اسفند ۱۳۸۶.
- [18] *The First International Signature Verification Competition*, 2004, (SVC2004), available in <http://www.cse.ust.hk/svc2004/>



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: (الف) طیف فرکانسی جزئیات سیگنال x یک نمونه امضا در حوزه DWT و (ب) طیف فرکانسی جزئیات سیگنال x یک نمونه امضا در حوزه SWT.

۳-۵ طیف فرکانسی جزئیات در حوزه‌های DWT و SWT

برای یافتن دلایل برتری SWT نسبت به DWT در کاربرد تأیید امضا، طیف فرکانسی جزئیات سیگنال‌ها در حوزه DWT و SWT مورد بررسی قرار گرفت. طیف فرکانسی جزئیات سیگنال x یک نمونه امضا در حوزه DWT و SWT به ترتیب در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان داده شده است. برای سایر امضاها نیز طیف‌های فرکانسی جزئیات تقریباً شبیه شکل‌های نشان داده شده است.

مقایسه طیف فرکانسی جزئیات نشان می‌دهد که جزئیات در حوزه SWT دارای مؤلفه‌های فرکانسی در محدوده ۲۰-۰ هرتز هستند و این طیف فرکانسی اعمال ارادی دست انسان را تحت پوشش قرار می‌دهد [۵]. در حالی که جزئیات در حوزه DWT مؤلفه‌های مهمی در محدوده ۵۰-۳۰ هرتز هستند، این مؤلفه‌های فرکانسی از خطای درون‌یابی ناشی می‌شوند و باعث افزایش تغییرات درون‌کلاسی و خطای تأیید می‌شوند [۱۶]. خطای درون‌یابی نیز به خاطر شیوه محاسبه جزئیات با تبدیل DWT به‌وجود می‌آید.

۶- نتیجه‌گیری

افزایش تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی کارایی سیستم تأیید امضا را بهبود می‌دهد. در این تحقیق با استفاده از تطابق نقاط فرینه برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها و محاسبه شباهت بین جزئیات سیگنال‌ها در حوزه SWT، تمایز بین امضاهای اصلی و جعلی افزایش داده شد و برای مجموعه امضاهای SVC2004 و امضاهای جعلی حرفه‌ای $EER = 6\%$ به دست آمد، در حالی که با استفاده از تطابق همه نقاط برای یکسان‌سازی طول زمانی سیگنال‌ها و محاسبه شباهت در حوزه زمان $EER = 14.21\%$ به دست می‌آید. علی‌رغم استفاده از آستانه

احسان‌اله کبیر کارشناسی ارشد پیوسته خود را در مهندسی برق و الکترونیک از دانشکده فنی دانشگاه تهران و دکترای خود را در مهندسی سیستم‌های الکترونیک از دانشگاه اسکس در انگلستان، به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۶۹ دریافت کرد. او اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازشناسی الگو، به ویژه بازشناسی متون چاپی و دستنویس.

مرتضی ولی‌زاده کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در مهندسی برق و الکترونیک به ترتیب از دانشگاه صنعتی شاهرود و دانشگاه تربیت مدرس در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ دریافت کرد. او از سال ۱۳۸۶ در دانشگاه تربیت مدرس به عنوان دانشجوی دکتری مشغول به تحصیل است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش تصویر، پردازش سیگنال، بازشناسی الگو و آستانه‌یابی تصاویر متنی.