

Верифікація Користувача на Основі Фазового Портрету Електрокардіограми

Леонід Файнзільберг
кафедра біомедичної кібернетики
Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського,
Київ, Україна
fainzilberg@gmail.com

Анастасія Заболотна
кафедра біомедичної кібернетики
Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського,
Київ, Україна,
nastiaklumchenko@ukr.net

Юлія Осадча
кафедра біомедичної кібернетики
Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського,
Київ, Україна,
josadcha@heliostech.f

User Verification Based on Electrocardiogram Phase Portrait

Leonid Fainzilberg
department of biomedical cybernetics
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
fainzilberg@gmail.com

Anastasija Zabolotna
department of biomedical cybernetics
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
nastiaklumchenko@ukr.net

Yulia Osadcha
department of biomedical cybernetics
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
josadcha@heliostech.f

Анотація — Розвивається метод верифікації користувача шляхом порівняння фазового портрету його поточної електрокардіограми з заздалегідь відомим класом. Запропонована процедура визначення відстані між фазовими портретами, на основі якої проведена кластеризація фазових портретів навчальної вибірки. Представлено результати проведених експериментальних досліджень.

Abstract — The method of user verifying by comparing a phase portrait of his current electrocardiogram with a known class is developed. A procedure for determining the distance between phase portraits is proposed. Clustering of phase portraits from a training set on the basis of this procedure is carried out. The results of the experimental studies are presented.

Ключові слова — верифікація; електрокардіограма; фазовий портрет; логін; пароль

Keywords — verification; electrocardiogram; phase portrait; login; password

I. ВСТУП

Проблема біометричної ідентифікації людини, яка ґрунтується на аналізі індивідуальних характеристик особистості, набуває все більшої актуальності. Один зі способів вирішення такої проблеми, заснований на індивідуальних характеристиках одноканальної електрокардіограми (ЕКГ), вперше був запропонований українськими фахівцями в роботі [1] ще в 1995 році. І тільки через шість років, як це часто буває в науці, з'явилася закордонна публікація [2], присвячена «новому» методу ідентифікації особистості за ЕКГ. Згодом цей метод

активно розвивався в численних публікаціях інших авторів, зокрема, в роботах [3-14].

Дослідження, представлені в монографії [15], демонструють, що індивідуальні особливості ЕКГ-сигналу $z(t)$ більш виразно проявляються на фазовій площині в координатах $z(t), \dot{z}(t)$, де $\dot{z}(t)$ – швидкість електричної активності серця. Мета роботи – подальший розвиток саме такого підходу.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай $z(t_k)$ – цифрова послідовність дискретних значень скалярного сигналу $z(t)$, що реєструють в одному зі стандартних ЕКГ-відведень та спостерігають в моменти часу $t_k \equiv k\Delta$, $k=1, \dots, K$, де Δ – крок квантування.

Після попереднього оброблення масиву $z(t_k)$ (видалення дрейфу ізоелектричної лінії, частотно-вибіркової фільтрації та адаптивного згладжування) вдається на основі спеціальної процедури [15] чисельного диференціювання отримати прийнятну оцінку похідних $\dot{z}(t_k)$ сигналу $z(t)$ в дискретні моменти часу t_k . В результаті формується фазовий портрет ЕКГ (ФП ЕКГ)

$$(z(t_1), \dot{z}(t_1)), (z(t_2), \dot{z}(t_2)), \dots, (z(t_K), \dot{z}(t_K))),$$

який, подібно до відбитка пальця, має характерні особливості, що властиві конкретним особам (рис. 1).

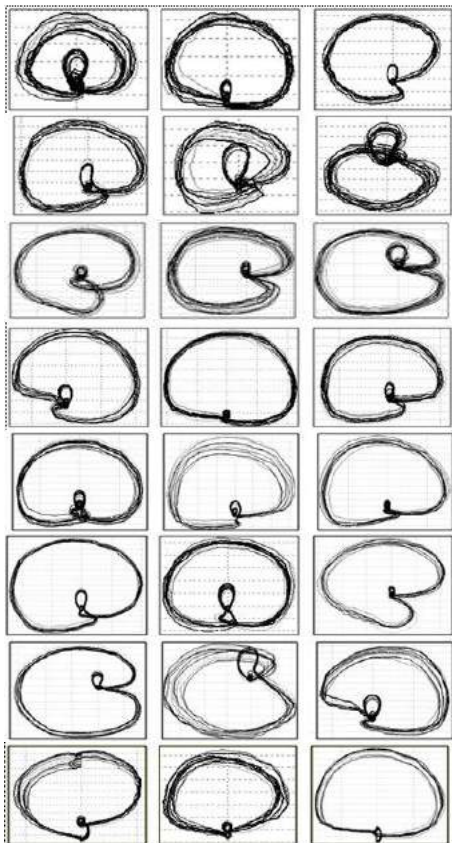


Рис.1. Приклади фазових портретів ЕКГ 24 осіб

З рис. 1 видно, що ФП ЕКГ одних людей істотно розрізняються, а в інших – є лише незначні відмінності.

Зрозуміло, не виключені ситуації, коли ФП ЕКГ різних людей взагалі однакові та практично не розрізняються. З цього випливає, що не просто розробити систему надійної ідентифікації конкретної людини за ФП ЕКГ. Принаймні таке завдання можна вважати лише далекою метою.

Водночас, в якості близької мети можна сформулювати більш просту задачу: відносити ФП ЕКГ конкретної людини до певного класу (число таких класів можна задати не дуже великим) і проводити тільки верифікацію особистості шляхом зіставлення ФП ЕКГ, що спостерігається, з номером класу ФП ЕКГ, який подібно групі крові відповідає даній особі. При розбіжності класів з високою ймовірністю можна стверджувати про негативний результат верифікації і приймати відповідні рішення.

III. КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ЕКГ

Нехай маємо навчальну вибірку Q ЕКГ різних користувачів:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_Q\}. \quad (1)$$

Будемо оцінювати близькість між кожною парою $S_\mu \in S$ та $S_\nu \in S$ абсолютною величиною різниці між функціями $\Psi_\mu(x, y)$ і $\Psi_\nu(x, y)$, які характеризують число чорних пікселів в полі зображень фазових портретів S_μ і S_ν та належать квадратним коміркам зі сторонами ε в координатах x та y фазової площини (рис. 2):

$$L_{\mu\nu} = \sum_{x,y} |\Psi_\mu(x, y) - \Psi_\nu^{(j)}(x, y)|. \quad (2)$$

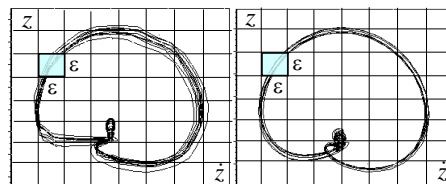


Рис. 2. Пояснення до методу оцінювання відстані між двома ФП ЕКГ

Для спрощення процедури порівнювання ФП ЕКГ перед визначенням відстані (2) проводиться нормування фазових координат за формулами

$$z^*[t_k] = \frac{z[t_k] - \min_{1 \leq k \leq K} z[t_k]}{\max_{1 \leq k \leq K} z[t_k] - \min_{1 \leq k \leq K} z[t_k]}, \quad k=1, \dots, K, \quad (3)$$

$$\dot{z}^*[t_k] = \frac{\dot{z}[t_k] - \min_{1 \leq k \leq K} \dot{z}[t_k]}{\max_{1 \leq k \leq K} \dot{z}[t_k] - \min_{1 \leq k \leq K} \dot{z}[t_k]}, \quad k=1, \dots, K. \quad (4)$$

Експериментально встановлено, що з точки зору критерію максимуму відношення міжкласового та внутрішньокласового відстаней оптимальний розмір комірок має дорівнювати

$$\varepsilon = 0,125\Delta,$$

де Δ – розмір полю зображень ФП ЕКГ. В такому випадку поле зображень покривають $N = 8 \cdot 8 = 64$ квадратних комірок.

Сформуємо квадратну матрицю

$$\Lambda = \begin{pmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1Q} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2Q} \\ \dots \\ L_{Q1}, L_{Q2}, \dots, L_{QQ} \end{pmatrix}$$

відстаней між парами фазових портретів навчальної вибірки, за якою проведемо каскадну кластеризацію ФП ЕКГ. Першу пару кластерів ФП ЕКГ визначає елемент матриці Λ , що відповідає максимуму з відстаней L_{uv} .

Для визначення інших кластерів впорядкуємо рядок матриці Λ , що відповідає першому кластеру. Наявність «стрибка» на послідовності \mathcal{R}_q , $q = 1, \dots, Q$ впорядкованих відстаней (рис. 3) визначає порогове значення q_0 , за яким проводиться подальша кластеризація ФП і т.д.

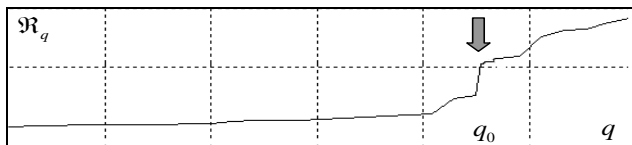


Рис. 3. Графік впорядкованих відстаней між кластерами ФП ЕКГ

На основі аналізу 300 ЕКГ записів 115 різних осіб визначено $J = 5$ характерних класів ФП ЕКГ (рис. 4).

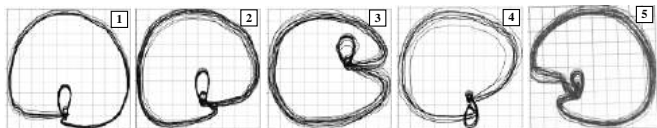


Рис. 4. П'ять характерних класів ФП ЕКГ

Оброблення ретроспективних спостережень показали, що у конкретної особи характерний тип ФП ЕКГ практично не змінюється протягом тривалого терміну (табл.1), якщо, зрозуміло, у цей період не сталися грубі органічні ураження серця.

ТАБЛИЦЯ 1. Динаміка змін ФП ЕКГ у трьох волонтерів

Рік	Волонтер Ф.	Волонтер Ж.	Волонтер Т.
ФП	Клас 1	Клас 2	Клас 3
2005			
2013			
2018			

Будемо проводити подальшу верифікацію користувачів за еталонами фазових портретів $\Phi\Pi_0^{(1)}, \dots, \Phi\Pi_0^{(J)}$, які визначимо за мінімальною сумою відстаней до інших фазових портретів кожного j -го класу, $j = 1, \dots, J$, тобто

$$\Phi\Pi_0^{(j)} = \arg \min_{1 \leq v \leq Q_j} \sum_{\mu=1}^{Q_j} L_{\mu v}^{(j)}, \quad (6)$$

де Q_j – кількість ФП j -го класу в навчальній вибірці.

IV. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ

На рис. 5 представлена структура ІТ, яка забезпечує верифікацію людини за ФП ЕКГ.



Рис. 5. Структура ІТ верифікації людини за ФП ЕКГ

Верифікація проводиться за відомим класом $\Phi\Pi_z$ фазового портрету, характерним для конкретної особи. Така інформація (логін z -го користувача) отримують шляхом сканування мікропроцесорного чипу його біометричного паспорту, кредитної картки або іншого документа.

В якості паролю доступу визначається фазовий поточний ЕКГ z -го користувача. Для цього застосовують мікропроцесорний сенсор з пальцевими електродами, за допомогою якого реєструють та передають у цифровій формі до комп'ютера поточну ЕКГ користувача $S_z^{(t)}$.

Відповідний фазовий портрет $\Phi\Pi_z^{(t)}$ порівнюється з еталонами $\Phi\Pi_0^{(1)}, \dots, \Phi\Pi_0^{(J)}$, що зберігаються в БД системи.

Порівняння здійснюється шляхом обрахунку відстаней

$$L(\Phi\Pi_z^{(t)}, \Phi\Pi_0^{(j)}) = \sum_{x,y} |\Psi^{(t)}(x,y) - \Psi^{(j)}(x,y)| \quad (7)$$

між фазовим портретом $\Phi\Pi_z^{(t)}$ поточної ЕКГ z -го користувача і всіма еталонами $\Phi\Pi_0^{(j)}$, $j = 1, \dots, J$.

Система автоматично визначає номер еталону $\Phi\Pi_0^{(t)}$, який знаходиться на мінімальній відстані (7) від фазового портрету $\Phi\Pi_z^{(t)}$ поточної ЕКГ, тобто

$$\Phi\Pi_0^{(t)} = \arg \min_{1 \leq j \leq J} L(\Phi\Pi_z^{(t)}, \Phi\Pi_0^{(j)}). \quad (8)$$

Рішення про позитивну верифікацію приймається лише в тому випадку, коли визначений $\Phi\Pi_0^{(t)}$ співпадає з введеним логіном $\Phi\Pi_z$, тобто

$$\Phi\Pi_0^{(t)} = \Phi\Pi_z. \quad (9)$$

На екзаменаційній виборці із 204 записів ЕКГ 62 різних осіб було допущено лише 1 помилку верифікації (0,5 %).

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження підтвердили, що після нормування фазових координат можна спростити процедуру визначення близькості між ФП ЕКГ шляхом обчислення абсолютною величиною різниці між функціями, що характеризують число чорних пікселів в полі зображень фазових портретів та належать елементарним квадратним коміркам фазової площини. Експериментальним шляхом встановлено, що з точки зору критерію максимуму відношення міжкласового та внутрішньокласового відстаней оптимальний розмір комірок має дорівнювати 12,5 % від розміру квадратного поля зору ФП.

Каскадна процедура кластеризації за 300 записами ЕКГ 115 різних осіб з навчальної вибірки дозволила визначити п'ять характерних класів ФП. Багаторічні спостереження підтвердили, що характерний тип ФП ЕКГ конкретної особи практично не змінюється протягом тривалого терміну.

Розроблена інтелектуальна ІТ дозволяє проводити верифікацію людини на основі порівняння фазового портрету його поточної ЕКГ зі всіма еталонами, що зберігаються в бази даних. Рішення про позитивну верифікацію приймається лише в тому випадку, коли поточний ФП співпадає з задалегідь відомим еталонним ФП, характерного для цієї людини.

Запропонований метод забезпечує достатньо високу надійність верифікації: при тестуванні 204 записів ЕКГ 62

різних осіб з незалежної екзаменаційної вибірки було допущено лише 1 помилку.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] L.S Fainzilberg., T.P., Potapova, (1995) "Computer Analysis and Recognition of Cognitive Phase Space Electro-Cardio Graphic Image" in *Computer analysis of Images and Patterns: Proceeding of the 6th International Conference (CAIP'95)*, Prague (Czech Republic), pp. 668-673.
- [2] L Biel., O Petterson., L Philipson., P. Wide, (2001). "ECG Analysis: a New Approach in Human Identification" in *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, No. 50 (3), pp. 808–812.
- [3] T.W. Shen W.J., Tompkins., Y.H. Hu, (2002). "One-lead ECG for Identity Verification" in *IEEE Engineering in Medicine and Biology: in Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 24th Annual Conference and the 2002 Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society (BMES / EMBS)*, Vol. 1, pp. P.62–63.
- [4] S.A. Israel S.A., J.M Irvine, A. Cheng, M.D. Wiederhold, B.K. Wiederhold, (2005). "ECG to Identify Individuals" in *Pattern Recognition*, Vol. 38, No.1, pp. 133–142.
- [5] Z. Zhang, D. Wei (2006). "A new ECG Identification Method using Bayes' Theorem" in *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON '06)*, Hong Kong, pp. 1-4.
- [6] G. Wtibbler, M. Stavridis, D. Kreisler, R.D. Bousseljot, C. Elster (2007). "Verification of Humans using the Electrocardiogram" in *Pattern Recognition Letters*, Vol. 28, Issue 10, pp. 1172-1175.
- [7] C.C Chiu., C. Chuang, C. A. Hsu (2008). "Novel Prsonal Identity Verification Approach using a Discrete Wavelet Transform of the ECG Signal" in *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering*, pp. 201-206.
- [8] O. Boumbarov, Y. Velchev, S. Sokolov (2009). "ECG Personal Identification in Subspaces using Radial Basis Neural Networks" in *IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, pp. 446-451.
- [9] I. Odinaka, P.-H. Lai., A. Kaplan, J. O'Sullivan., E. Sirevaag, S. Kristjansson, A. Sheffield, J. Rohrbaugh. (2010). "ECG Biometrics: A Robust Short-time Frequency Analysis" in *IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*. pp. 1–6.
- [10] C.M. Ting, S.H. Salleh. (2010). "ECG Based Personal Identification using Extended Kalman Filter" in *10th International Conference on Information Sciences Signal Processing and Their Applications*, pp. 774- 777.
- [11] Ch.Hegde, H.R.Prannu, D.S.Sagar, P.D.Shenoy, K.R.Venuopal, L.M. Patnaik. (2010). "Human Authentication Based on ECG Waves Using Radon Transform" in *Security Technology, Disaster Recovery and Business Continuity. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 122, pp. 197-206.
- [12] F. Poree, A.Gallix, G. (2011) "Carrault Biometric Identification of Individuals based on the ECG. Which conditions?" // *Computing in Cardiology*, Vol. 38. pp. 761-764.
- [13] B. Noureddine, N.A. Amine, F. Régis, B.R. Fethi. (2012). "ECG based Human Authentication using Wavelets and Random Forests" in *International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS)*. Vol. 2, No. 2. pp. 1-11.
- [14] Y.N Singh., S.K. Singh. (2012). "Evaluation of Electrocardiogram for Biometric Authentication" in *Journal of Information Security*, Vol. 3, pp. 39-48.
- [15] Л.С. Файнзильберг. (2017). "Основы фазографии". Киев: Освіта України, 264 с.