

Аналіз Фетальної Електрокардіограми - це дуже важлива процедура під час діагностики здоров'я дитини в утробі матері. Робиться це з ціллю моніторингу стану плоду під час перебігу вагітності.

Сигнал ЕКГ плоду записується за допомогою одного електрода, який розміщений на голівці плода (Фетальна Електрокардіограма), і ще 4 сигнали - з живота матері (Абдомінальна Електрокардіограма). Проте під час запису сигналів таким способом сигнали ЕКГ матері та плоду накладаються і сигнал плоду виходить викривленим, тож нам потрібно його очистити щоб побачити Частоту Серцевих Скорочень плоду та проаналізувати її. Для цього нам потрібно імплементувати та порівняти різні методи очищення ФЕКГ від материнського сигналу.

База даних сигналів складається із п'яти записів зареєстровані у пологах між 38 та 41 тижнями вагітності. У файлах .edf записані вхідні діапазони, пряма електрокардіограма записана із голівки плода, чотири сигнали із живота матері, під час постійного розташування електродів під час усіх записів. Частота дискретизації сигналу 1 кГц, смуга пропускання від 1 до 150-ти Гц. Була проведена додаткова фільтрація для усунення перешкод лінії живлення (50 Гц) та дрейфу базової лінії. Роздільна здатність - 16 біт.

Схожі бази даних (із файлами ЕКГ сигналів та розміщення R-піків) аналізували різними способами для отримання чистої ФЕКГ.

В одній із статей [2] розглядався метод очищення ФЕКГ за допомогою подвійного фільтру Савицького-Голея.

Дуже часто фільтрація видаляє із сигналу потрібні дані та дуже згладжує його піки та спади, що погано для подальшого аналізу, тому що зникають основні та важливі особливості сигналу. Фільтр Савицького-Голея підтримує цілісність вихідного сигналу зберігаючи його особливості, що корисно для нашого завдання очищення ФЕКГ.

Принцип роботи цього фільтра полягає у пересуванні вікна фіксованого розміру над даними та підбираючи поліном до точок в цьому вікні. Значення полінома в центральній точці цього вікна береться як згладжене значення. Цей процес повторюється для кожної точки в наборі даних, що призводить до згладженого сигналу.

Основна ідея методу полягає в апроксимації точок даних у рухомому вікні поліномом певного степеня. Наприклад, для набору точок  $(x_i, y_i)$ , де  $i$  змінюється від 1 до  $N$ , ми хочемо підігнати поліном степеня  $p$  до цих точок.

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_p x^p$$

Для заданого вікна нам потрібно так підібрати коефіцієнти  $a_0, a_1 \dots$  щоб вони якнайраще підходили для точок, які знаходяться в цьому вікні.

$$\text{Minimize } \sum_{i=-m}^m \left( y_{k+i} - \sum_{j=0}^p a_j x_{k+i}^j \right)^2$$

мінімізація суми квадратів різниць між фактичними точками даних  $y_i$  та значеннями полінома  $y_{ih}$ . Тут  $2m+1$  — розмір вікна з центром навколо точки  $x_k$ .

Стандартні випадки:

- Малий розмір вікна, низький степінь полінома: фільтр згладжує дані, але погано фіксує загальну тенденцію, особливо для вищих частотних компонент.
- Малий розмір вікна, високий степінь полінома: фільтр погано вкловлює складніші тенденції сигналу.
- Великий розмір вікна, низький степінь полінома: фільтр стабільно все згладжує, але може згладити важливі характеристики сигналу.
- Великий розмір вікна, високий степінь полінома: фільтр фіксує складні тенденції, що дає ефективне згладження, але розмір вікна може бути занадто великим відносно частотних компонент сигналу.

Для нашого сигналу нам краще обрати малий розмір вікна та низький степінь полінома, щоб ефективно згладити дані.

У іншій статті ([3]) розглядався метод SVD, Singular Value Decomposition, Сингулярне Розкладання - алгоритм узагальнення розкладу матриці на будь-яку матрицю, без припущення, що матриця квадратна.

Формула SVD виглядає так:

$M = U \Sigma V^t$ , де:

- $M$  — вихідна матриця, яку ми хочемо розкласти.
- $U$  — ліва сингулярна матриця (стовпці — ліві сингулярні вектори).  
Стовпці  $U$  містять власні вектори матриці  $MM^t$ .
- $\Sigma$  — діагональна матриця, що містить сингулярні власні значення

- $V$  — права сингулярна матриця (стовпці — праві сингулярні вектори).  
 $V$  стовпці містять власні вектори матриці  $M^T M$ .

Працює цей алгоритм так:

- Змінює базис зі стандартного на базис  $V$  (за допомогою  $V^T$ )
- Застосовується перетворення описане матрицею  $\Sigma$ . Це масштабує наш вектор в новому базисі  $V$
- Змінюємо базис  $V$  на базис  $U$

Другий спосіб очищення ФЕКГ, який описувався в цій ж статті, [3] & [4] метод ICA. Independent Component Analysis, Незалежний компонентний аналіз - техніка, яка дозволяє відокремлювати та ідентифікувати базові незалежні джерела в багатовимірному наборі даних.

Ця техніка аналізу важлива, тому що вона дозволяє зрозуміти приховану структуру набору даних, її можна використовувати в різних програмах: від обробки сигналів, до фінансів. Це - алгоритм неконтрольованого навчання у сфері штучного інтелекту, суть якого - розділити багатовимірний сигнал на додаткові підкомпоненти, щоб відсіяти непотрібні шуми та сигнали, які викривлюють той сигнал, який нас цікавить.

Працює цей алгоритм за такою формулою:



$$\vec{s} = A^{-1} * \vec{x}$$

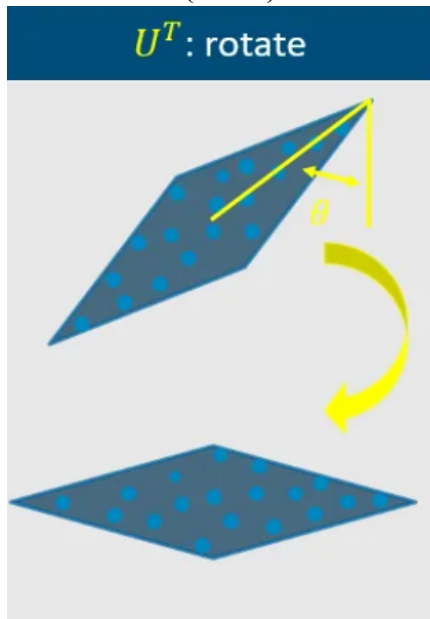
, де

- $S$  - незалежні сигнали, які ми хочемо отримати
- $A$  - матриця змішування материнських сигналів
- $x$  - виміряні сигнали

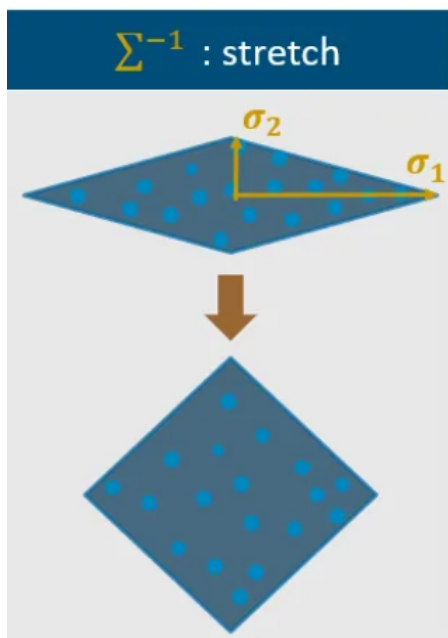
Проте для отримання матриці  $A$ , матриці змішування материнських сигналів, потрібно виконати додаткові дії:

$$A^{-1} = (U^T \Sigma^{-1} V)$$

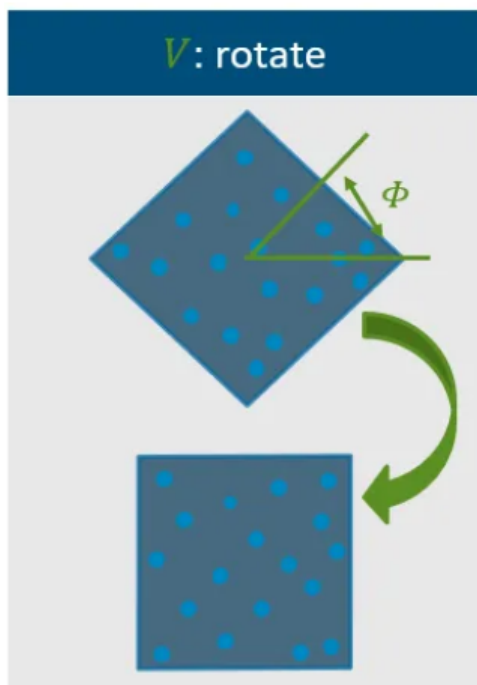
- 1) Пошук кута із максимальною дисперсією для повороту ( $U^T$ )  
Перший кут повороту тета шукається за допомогою аналізу головних компонент (PCA).



- 2) Пошук масштабування головних компонент ( $\Sigma$ )  
Мета цього кроку - розтягнути нашу матрицю за допомогою відхилень від даних сигма 1 та сигма 2.



- 3) Кінцевий поворот матриці для відновлення сигналу  
 Поворот матриці довкола кута  $\Phi$  для відновлення вхідних розмірів сигналів.



Також у статті [8] розглядався метод заміни материнського сигналу у ФЕКГ значенням ізолінії.

Метод визначення місцезнаходження QRS комплексу у сигналі ЕКГ. Його

суть полягає у виявленні ділянок QRS комплексу із подальшим накладанням ізолінії на ці ділянки. Це дозволяє отримати очищений сигнал для подальшого аналізу.

Імплементація усіх цих методів є у .ipynb файлі, разом із усіма графіками для кожного .edf файлу. Імплементувалось все на мові програмування Python за допомогою інструментів бібліотеки sklearn (FastICA, TruncatedSVD) та scipy (savgol\_filter, butter, filtfilt).

Ефективність оцінювалась значенню SNR.

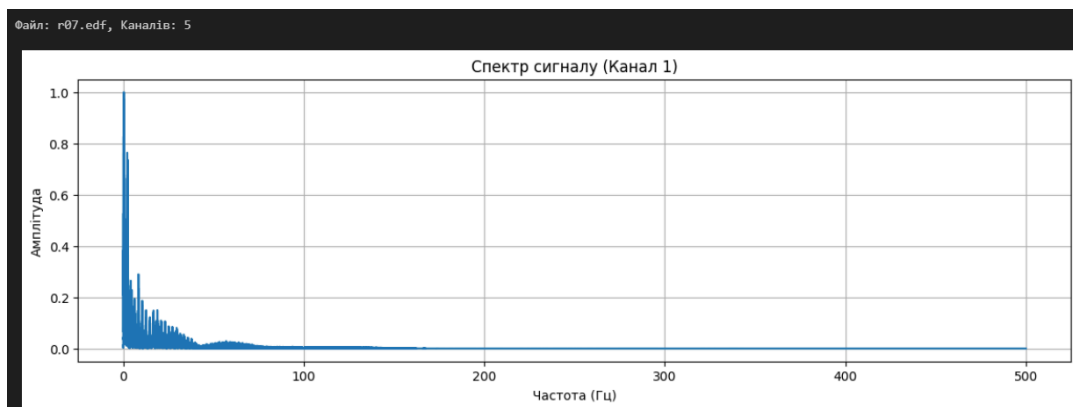
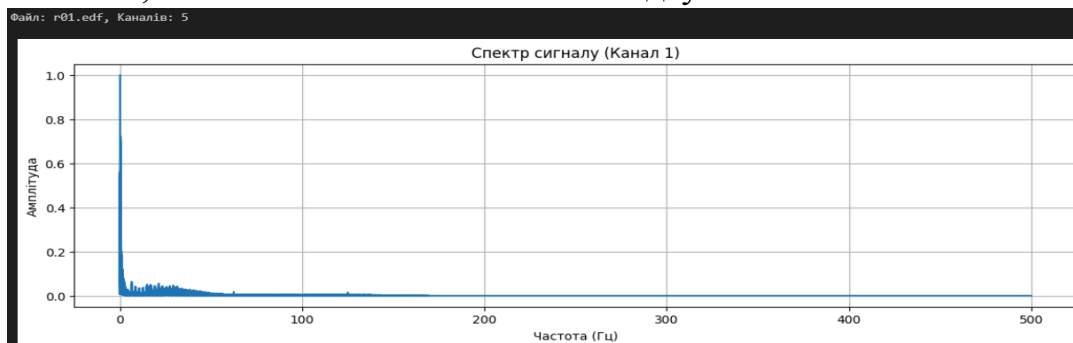
Результати:

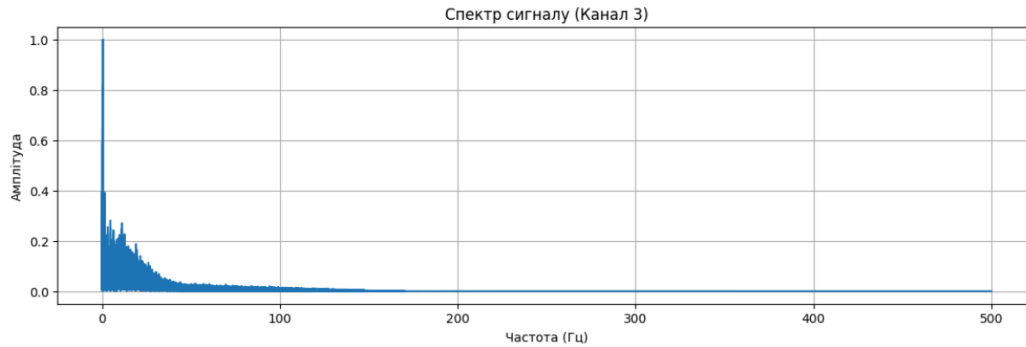
Наші файли .edf містять 5 сигналів - 1 сигнал дитини та 4 сигнали матері.

Ефективність методу оцінювалась по графіках та значенню SNR.

### 1) Спектри сигналів

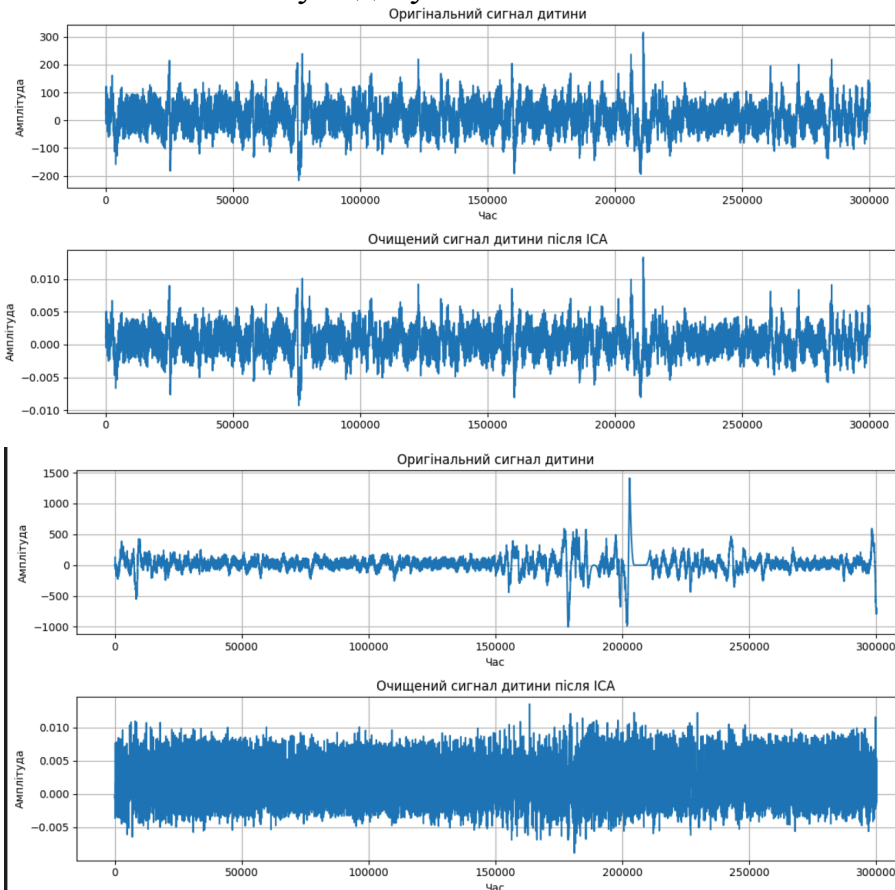
Із графіків спектрів сигналів ми можемо зробити висновок, що у сигналах присутня велика кількість низькочастотних компонент, деякі канали сигналів демонструють більш рівномірний розподіл енергії по частотах. Загалом високі значення на графіку присутні на низьких частотах, а скачки на високих - майже відсутні.





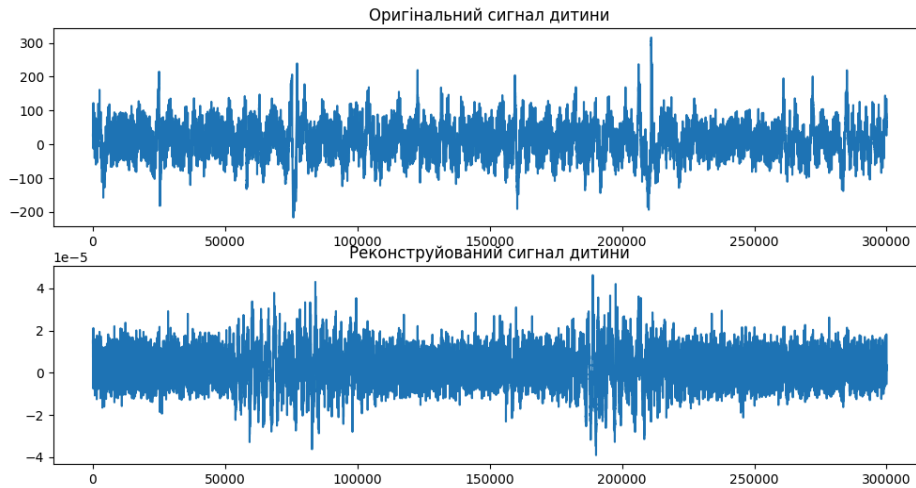
## 2) ICA:

Як ми можемо побачити для першого файлу очищення майже не відбулось (перше зображення графіків), для останнього - також (друге зображення графіків). По відношенню SNR (таблиця після результатів всіх методів) можна зробити висновок, що цей метод не дуже добре виконав поставлену задачу.



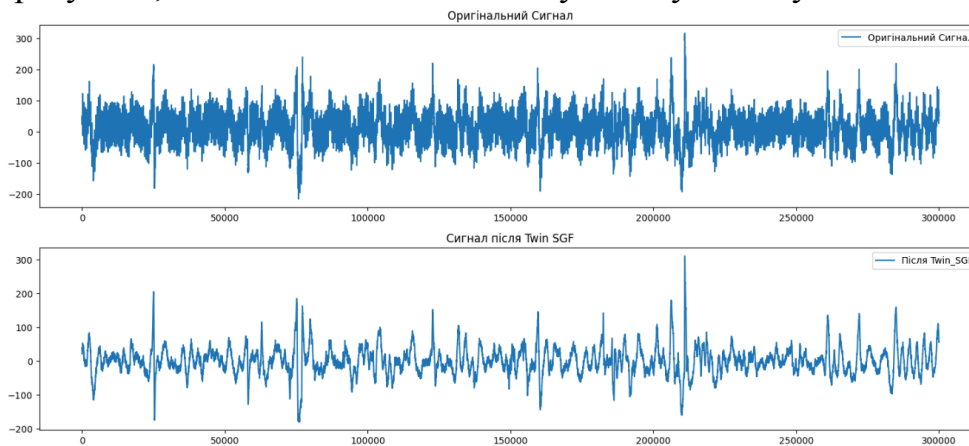
## 3) SVD

По графіках цього методу та його значеннях SNR також можна зробити висновок, що він не дуже добре виконав поставлену задачу.



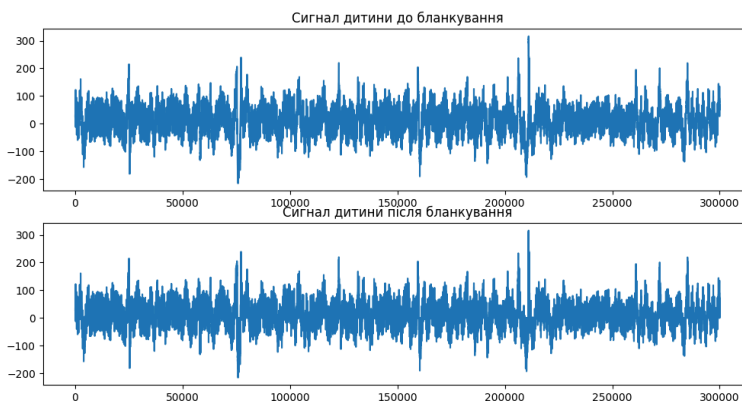
#### 4) Подвійна фільтрація Савицького-Голея

Цей метод працює краще, на графіку видно, що сигнал більш очищений, ніж оригінальний і значення SNR додатні, що дає нам зрозуміти, що цей метод поставлену задачу виконує.



#### 5) Ізолінія

Із графіки та значення SNR можна зробити висновок, що цей метод також непогано очищає наш сигнал.





Значення SNR:

Метод\Файл	r01.edf	r04.edf	r07.edf	r08.edf	r10.edf
ICA	-87.52 дБ	-93.24 дБ	-86.20 дБ	-91.64 дБ	-97.80 дБ
SVD	-136.00 дБ	-138.85 дБ	-135.16 дБ	-139.15 дБ	-151.21 дБ
Подвійна Фільтрація Савицького-Г оля	11.00 дБ	9.10 дБ	15.34 дБ	10.52 дБ	8.53 дБ
Ізолінія	12.06 дБ	12.59 дБ	12.37 дБ	12.16 дБ	12.63 дБ

Як ми можемо побачити по значеннях в таблиці, найкращі значення SNR у методу Ізолінії, але разом із цим дуже гарні значення має метод Савицького-Голя. Методи ICA та SVD мають від'ємні значення SNR, що погано, але причиною цього може бути помилка в імплементації цих методів.

Із цих даних можна зробити висновок, що метод Ізолінії та Савицького-Голя найкраще підходять для очищення ФЕКГ від шумів та впливу материнських сигналів.

Подальші дослідження включатимуть в себе покращення імплементації методів SVD та ICA, що, швидше за все, призведе до кращих результатів роботи цих методів для конкретної задачі.

Джерела:

[1] PhysioNet. (n.d.). *Abdominal and Direct Fetal ECG Database, Version 1.0.0*. Retrieved from <https://physionet.org/content/adfecgdb/1.0.0/>

[2] S. R. Breesha, S. S. Vinsley (2023) *Automated Extraction of Fetal ECG Signal Features Using Twinned Filter and Integrated Methodologies* <https://link.springer.com/article/10.1007/s00034-023-02494-0>

[3] M. Kotas, J. Jezewski, K. Horoba, A. Matonia (2011) *Application of spatio-temporal filtering to fetal electrocardiogram enhancement*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169260710001781>

[4] M. Kotas, J. Jezewski, A. Matonia, T. Kupka (2010) *Towards noise immune detection of fetal QRS complexes*  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169260709002727>

[5] Jonas Dieckmann (2023) *Introduction to ICA: Independent Component Analysis*  
<https://towardsdatascience.com/introduction-to-ica-independent-component-analysis-b2c3c4720cd9>

[6] Risto Hinno (2024) *Singular Value Decomposition (SVD) Algorithm Explained*  
<https://builtin.com/articles/svd-algorithm>

[7] Thomas Konstantinovsky (2024) *Introduction to the Savitzky-Golay Filter: A Comprehensive Guide (Using Python)*  
<https://medium.com/pythoneers/introduction-to-the-savitzky-golay-filter-a-comprehensive-guide-using-python-b2dd07a8e2ce>

[8] Adam Matonia, Janusz Jezewski, Tomasz Kupka, Krzysztof Horoba, Janusz Wrobel, Adam Gacek (2006) *The influence of coincidence of fetal and maternal QRS complexes on fetal heart rate reliability*  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11517-006-0054-0#citeas>