

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ ПЛОДУ В УТРОБІ МАТЕРІ У СУМІШІ ІЗ ЗАВАДАМИ

*Розроблено метод, який дає можливість оперативно із заданою достовірністю виявити електрокардіосигнал (ЕКС) плоду в утробі матері. Задача формулюється так, що необхідно виявляти ЕКС плоду у адитивній суміші ЕКС матері та завади типу білого гаусівського шуму (БГШ) за енергіями умовних еталонів. При цьому для вибору рішення застосовано критерій Неймана-Пірсона.*

*A method that gives an opportunity operatively with the set authenticity to discover to the electrocardiosignal (ECS) fruit in the womb of mother is worked out. A task is formulated so, that it is necessary to discover ECS to the fruit in additive ECS mothers and hindrances as white gaussian noise (WGH) after energies of conditional standards. Thus for the choice of decision the criterion of Neyman-Pirson is applied.*

*Ключові слова: електрокардіосигнал плоду та матері, завада, критерій Неймана-Пірсона.*

### Вступ

В ході спостереження за протіканням вагітності, особливо, ускладненої, виникає необхідність в реєстрації електрокардіосигналу (ЕКС) плоду і в моніторинзі характеристик його серцевого ритму [1,2]. В основному, інвазивні технології, які використовуються на сьогодні, забезпечують хорошу якість реєстрованого ЕКС і високу достовірність отримуваних характеристик серцевого ритму, але вимагають накладення одного з електродів на голівку плоду, і тому можуть застосовуватися тільки в ході пологів [3]. Для раннього ж діагнозу впродовж вагітності, який забезпечує своєчасність і ефективність відповідного лікарського втручання, найбільш відповідними є неінвазивні технології, базовані на використанні ЕКС плоду, зареєстрованого на поверхні тіла матері [4,5].

Хоча перші вдалі досліди в цьому напрямі були проведені вже більше сорока років тому, проте до останнього часу не було запропоновано надійних технологій і недорогої техніки, що дають можливість отримувати стійкі і достовірні результати. Проблема полягає в тому, що зареєстровані на поверхні тіла матері сигнали є сумішшю материнського ЕКС, значно нижчого (в 10 - 100 разів) по рівню ЕКС плоду і численних завад - мережевої завади, материнського електрокардіосигналу, дихальної складової, електродних артефактів і шумів реєструючої апаратури.

У результаті огляду праць, присвячених проблемі виділення ЕКС плоду із суміші встановлено, що сучасні методи та засоби ідентифікації математичних моделей ЕКС плоду побудовані без єдиного методології та не забезпечують необхідної достовірності результатів опрацювання. Для вирішення цієї проблеми дослідники застосовують ряд методів: адаптивна фільтрація [6], сліпе розділення сигналів [7,8], метод незалежних компонент [9], сингулярна декомпозиція [10], проєктивне розшарування [11], вейвлет-перетворення [12, 13].

Тому побудова нового методу, який би дав змогу виявляти ЕКС плоду з високою достовірністю прийнятого рішення, на сьогодні є досить актуальною задачею.

### 1. Постановка задачі

Попередній аналіз, проведений в працях [6-13], показує, що реалізацію ЕКС плоду можна розглядати як випадкову послідовність, яка є сумішшю дискретних ЕКС плоду, ЕКС матері і завади:

$$\xi(i\Delta t) = s_1(i\Delta t) + k \cdot s_2'(i\Delta t) + n(i\Delta t), \quad (1)$$

де  $s_1(i\Delta t)$  - дискретний ЕКС плоду,  $s_2'(i\Delta t)$  - дискретний ЕКС матері зареєстрований на грудному відведенні матері,  $n(i\Delta t)$  - завада,  $\Delta t$  - крок дискретизації ( $\Delta t > \frac{1}{2f_{\max}}$ , де  $f_{\max}$  - максимальна частота, якою обмежений спектр ЕКС),  $i$  - номер відліку,  $k$  - масштабуючий коефіцієнт, а саме відношення енергії ЕКС матері на грудному відведенні до енергії ЕКС матері на поверхні живота матері.

За аналогією з [3] покладено, що:

$$\xi(i\Delta t) = s_1(i\Delta t) + A \cdot s_2'(i\Delta t) + n(i\Delta t), \quad (2)$$

де  $A$  - невідомий параметр ( $A \in \{0,1\}$ ),  $s_2(i\Delta t)$  - ЕКС матері зареєстрований на животі матері.

Невідомий параметр  $A$  може приймати тільки одне з двох значень:  $A=1$  (в суміші  $\xi(i\Delta t)$  присутні ЕКС плоду та матері) і  $A=0$  (в суміші  $\xi(i\Delta t)$  присутній ЕКС плоду). Тобто, задачу виявлення ЕКС плоду у суміші зведено до задачі визначення рівня присутності ЕКС матері у суміші ( $k \cdot s_2'(i\Delta t)$ ,  $k$  -?, припущення ( $k$  трактовано як ймовірність присутності ЕКС матері у суміші)). Таке припущення обґрунтовано тим, що шляхом віднімання від суміші (1) ЕКС матері визначимо ступінь присутності ЕКС плоду на фоні дискретного білого шуму, і тим самим позбавимося у суміші складової матері, тобто  $s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t) = \xi(i\Delta t) - k \cdot s_2'(i\Delta t)$ . Тому задача виявлення ЕКС плоду із суміші є частковим випадком загальної задачі статистичної перевірки гіпотез.

## 2. Метод виявлення ЕКС плоду на тлі завад

Розглянуто дві гіпотези  $H_0$  і  $H_1$ :

$$H_0 : \xi(i\Delta t) = s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t) \quad - \text{відсутній ЕКС матері.}$$

$$H_1 : \xi(i\Delta t) = s_1(i\Delta t) + s_2(i\Delta t) + n(i\Delta t) \quad - \text{присутній ЕКС матері;}$$

Нехай завада - дискретний білий гаусівський шум (ДБГШ), який має рівномірну спектральну густину потужності  $N_0$  (Вт/Гц) у смузі частот і нормальну функцію розподілу, як і в [14].

Основною характеристикою випадкового процесу є ймовірність, зокрема функція розподілу ймовірності, яка характеризує залежність випадкової величини від ймовірності її появи.

Функцію розподілу для суміші ЕКС матері та плоду і шуму типу ДБГШ для  $m$  відліків, згідно з властивостями БГШ, подано у вигляді виразу:

$$F(\xi(i\Delta t)|H_1) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^m \exp\left( -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (\xi(i\Delta t) - s_1(i\Delta t) - s_2(i\Delta t))^2 \right). \quad (3)$$

де  $m$  - кількість відліків,  $\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{N_0}$  - середньоквадратичне відхилення ДБГШ.

Тоді функція розподілу суміші ЕКС плоду та шуму для  $m$  відліків:

$$F(\xi(i\Delta t)|H_0) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^m \exp\left( -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (\xi(i\Delta t) - s_1(i\Delta t))^2 \right), \quad (4)$$

Використовуючи баєсівську концепцію, отримано відношення правдоподібності функцій розподілу (4) і (5):

$$\Lambda = \frac{F(\xi(i\Delta t)|H_1)}{F(\xi(i\Delta t)|H_0)} = \exp\left\{\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N s_2^2(i\Delta t) - \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N \xi(i\Delta t)s_2(i\Delta t)\right\} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \Lambda_0, \quad (5)$$

де  $\Lambda_0$  - деяке порогове значення.

Логарифмуючи ліву і праву частини нерівності (6), а також враховуючи монотонність і зростаючий характер логарифмічної функції, з (6) отримано:

$$q = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N s_2^2(i\Delta t) - \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N \xi(i\Delta t)s_2(i\Delta t) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \ln(\Lambda_0), \quad (6)$$

де  $q = \ln \Lambda_0$ .

Для того, щоб виявити ЕКС плоду  $s_1(i\Delta t)$  чи матері  $s_2(i\Delta t)$  у суміші із завадами  $n(i\Delta t)$ , необхідно задатися попередніми (апріорними) відомостями, наприклад енергією сигналу, оскільки без них неможливо розрізнити ЕКС від будь-якого іншого сигналу, що унеможливує процес виявлення. Заданою енергією ЕКС матері на грудному відведенні  $s_2'(i\Delta t)$ , яка є апріорною бо реєструється паралельно до реєстрації ЕКС плоду на животі матері.

Енергію ЕКС матері обчислено з виразу:

$$E_{s_2} = \sum_{i=1}^m (s_2'(i\Delta t))^2 = priori. \quad (7)$$

Підставивши вираз (8) в (7) отримано:

$$q = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N \xi(i\Delta t)s_2(i\Delta t) \underset{H_1}{\overset{H_0}{\geq}} \left( \frac{E_{s_2}}{2\sigma^2} + \ln(\Lambda_0) \right) = h, \quad (8)$$

де  $h$  - абсолютний поріг.

При  $q > h$  приймається рішення про наявність ЕКС матері у суміші; а при  $q < h$  констатується його відсутність.

При кінцевому значенні енергії ЕКС матері і ДБГШ вибір рішення про присутність або відсутність ЕКС матері завжди супроводжується помилками двох видів: 1) ЕКС матері відсутній, БГШ перевищує  $h$  і приймається неправильне рішення про присутність (помилка 1-го роду); 2) ЕКС матері присутній, але БГШ не перевищує  $h$  і приймається помилкове рішення про відсутність (помилка 2-го роду).

В теорії виявлення сигналів помилку 1-го роду прийнято називати ймовірністю хибної тривоги, яку обчислюють за формулою [3, 4]:

$$\begin{aligned} p_f &= \int_h^\infty p(q | H_0) dq = \int_h^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\xi/H_0)} \exp\left(-\frac{(q - m(\xi/H_0))^2}{2\sigma^2(\xi/H_0)}\right) dq = \\ &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\xi/H_0)} \int_{-\infty}^h \exp\left(-\frac{(q - m(\xi/H_0))^2}{2\sigma^2(\xi/H_0)}\right) dq = 1 - \Phi\left(\frac{h - m(\xi/H_0)}{\sqrt{D(\xi/H_0)}}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $p(q | H_0)$  - умовна густина ймовірності розподілу величини  $q$  при відсутності ЕКС матері;

$m(\xi/H_0) = M\{q(\xi/H_0)\} = \frac{r_{s_1, s_2}}{\sigma^2}$  - математичне сподівання величини  $q$  при відсутності ЕКС матері;

$$D(\xi/H_0) = M\{(q(\xi/H_0) - m(\xi/H_0))^2\} = \left(r_{s_1, s_2} \left(1 - \frac{1}{\delta^2}\right)\right)^2 - \text{дисперсія величини } q \text{ при відсутності}$$

ЕКС матері;

$r_{s_1, s_2}$  - коефіцієнт взаємної кореляції між ЕКС матері та плоду;

$$\Phi - \text{інтеграл нормального розподілу, } \Phi(x) = \text{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Тоді ймовірність правильного рішення (вибір гіпотези  $H_1$ ) обчислюється:

$$p_d = \int_h^\infty p(q|H_1) dq = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(\xi/H_1)}} \int_h^\infty \exp\left(-\frac{(q - m(\xi/H_1))^2}{2D(\xi/H_1)}\right) dq =$$

$$1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi D(\xi/H_1)}} \int_{-\infty}^h \exp\left(-\frac{(q - m(\xi/H_1))^2}{2D(\xi/H_1)}\right) dq = 1 - \Phi\left(\frac{h - m(\xi/H_1)}{D(\xi/H_1)}\right), \quad (10)$$

де  $p(q|H_1)$  - умовна густина імовірності розподілу величини  $q$  при присутності ЕКС плоду.

$m(\xi/H_1) = M\{q(\xi/H_1)\} = \frac{r_{s_1, s_2} + E_{s_2}}{\sigma^2}$  - математичне сподівання величини  $q$  при присутності ЕКС матері;

$$D(\xi/H_1) = M\{(q(\xi/H_1) - m(\xi/H_1))^2\} = \left(r_{s_1, s_2} + E_{s_2}\right) \left(1 - \frac{1}{\sigma^2}\right)^2 - \text{дисперсія величини } q \text{ при}$$

присутності ЕКС матері;

Густини ймовірностей  $p(q/H_0)$  та  $p(q/H_1)$  зображені на рис. 1.

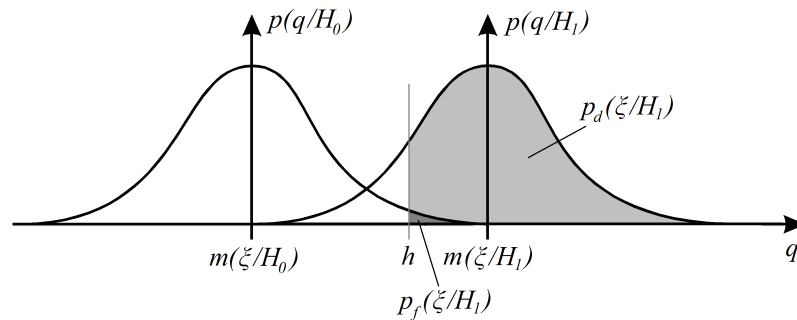


Рис. 1. Густини розподілу ймовірностей  $p(q/H_1)$  і  $p(q/H_0)$  ЕКС

Оскільки помилкове рішення може призвести до небажаних і важких наслідків (зокрема, неправильне лікування серцево-судинної системи плоду, яке призначається на основі діагнозу), тому будемо розглядати тільки такі рішення, для яких при заданому значенні ймовірності хибної тривоги  $p_f$  ймовірність правильного рішення  $p_d$  максимальна, - критерій Неймана-Пірсона [3, 4].

З виразу (10) при заданій мінімальній ймовірності  $p_f$  та виразу (9) отримано вираз для обчислення значення абсолютного порогу  $h$ :

$$h = \sqrt{D(\xi/H_0)} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m(\xi/H_0) + \frac{E_{s_2}}{2\sigma^2}. \quad (11)$$

Підставивши вираз (12) в (11) і враховуючи непарність функції  $\Phi(x)$ , отримано ймовірність правильного рішення про присутність ЕКС матері у суміші:

$$p_d = 1 - \Phi \left( \frac{\sqrt{D(\xi/H_0)} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m(\xi/H_0) + \frac{E_{s_2}}{2\sigma^2} - m(\xi/H_1)}{D(\xi/H_1)} \right) = k. \quad (12)$$

Підставивши вираз (13) у (2) і провівши ряд перетворення отримано вираз для виявлення складової  $s_1(i\Delta t)$  ЕКС плоду у суміші із ЕКС матері на тлі шуму артефактів, з метою подальшого його опрацювання (фільтрація суміші  $s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t)$  при відсутності ЕКС матері  $s_2(i\Delta t)$  з метою подавлення складової шуму  $n(i\Delta t)$  і виділення корисного ЕКС плоду  $s_1(i\Delta t)$ ):

$$s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t) = \xi(i\Delta t) - \left( 1 - \Phi \left( \frac{\sqrt{D(\xi/H_0)} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m(\xi/H_0) + \frac{E_{s_2}}{2\sigma^2} - m(\xi/H_1)}{D(\xi/H_1)} \right) \right) \cdot s_2'(i\Delta t). \quad (13)$$

### 3. Формула алгоритму виявлення ЕКС плоду на тлі завад

На основі запропонованого методу, який дає змогу при мінімальній помилці рішення  $p_f$  і максимальній достовірності  $p_d$  прийнятого рішення виділення складову ЕКС плоду у суміші (1), розроблено формулу алгоритму (14) його програмної реалізації на базі алгебри алгоритмів Овсяка В.К. [15]

$$\begin{aligned} & \left( \begin{array}{l} \xi(i\Delta t); s_2'(i\Delta t); r_{1:2}, \sigma, p_f \\ ; \\ E_{s_2} \\ ; \\ m(\xi/H_0); D(\xi/H_0) \\ ; \\ m(\xi/H_1); D(\xi/H_1) \\ ; \\ s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t) = \xi(i\Delta t) - \left( 1 - \Phi \left( \frac{\sqrt{D(\xi/H_0)} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m(\xi/H_0) + \frac{E_{s_2}}{2\sigma^2} - m(\xi/H_1)}{D(\xi/H_1)} \right) \right) \cdot s_2'(i\Delta t) \\ ; \\ s_1(i\Delta t) + n(i\Delta t) \end{array} \right) \quad (14) \\ & \text{де } i \in \overline{1; 2; 3; \dots; m}; \quad p_f \in \overline{0.001, 0.01, 0.1} \end{aligned}$$

Розроблена формула алгоритму комп'ютерного опрацювання суміші ЕКС (14) дає змогу розробити програмне забезпечення для виділення складової ЕКС плоду у суміші (1).

### Висновки

Розроблений метод та на його основі алгоритм дають можливість оперативно із заданою достовірністю при мінімальній ймовірності помилці виявити електрокардіосигнал плоду в утробі матері

на тлі ЕКС матері, мережевої завади, материнського електроміосигналу, дихальної складової, електродних артефактів та шумів реєструючу апаратури з метою раннього діагностування серцево-судинної системи плоду.

### Література

1. Пролигіна О.В. Сучасний стан здоров'я жінок дітородного віку та основні причини перинатальної і неонатальної захворюваності і смертності (огляд літератури) // *Biomedical and Biosocial Anthropology*.-2009.-№13.-С.268-273.
2. Курцер М.А. Перинатальная смертность и пути ее снижения: Автореф. Дисс...д-ра мед. наук. – М.: 2001. – 49 с.
3. В.А.Потапов Современные диагностические и лечебные технологии в акушерской, перинатальной и гинекологической практики // *Жіночий лікар*. – 2007. – № 5. – С.12.
4. В.И. Шульгин, А.В. Токарев Метод регистрации и анализа электрокардиограмми плода в ходе беременности // *Радіоелектронні і компютерні системи*. - 2008. - №3. – С. 66-75.
5. І.В. Лахно, О.В. Печенін, В.І. Шульгін. Можливості неінвазивного вивчення електрокардіограми плода // *Вісник Харківського національного університету. Збірник наукових праць*. – 2006. - Випуск 12.
6. Zarzoso V., Millet-Roig J., Nandi A.K. Fetal ECG Extraction from Maternal Skin Electrodes Using Blind Source Separation and Adaptive Noise Cancellation Techniques. In *Computers in Cardiology*, Boston, MA, September 24-27, 2000. - 431-434 pp.
7. Lathauwer L.De, Moor B.De, Vandewalle J. Fetal Electrocardiogram Extraction by Blind Source Subspace Separation. *IEEE transactions on biomedical engineering*, V. 47, No. 5, 2000. - 567-572 pp.
8. Lathauwer L.De, Moor B.De, Vandewalle J. Fetal Electrocardiogram Extraction by Source Subspace Separation. *Proceedings IEEE SP, Athos Workshop on Higher, Order Statistics*, Girona, Spain, 1994. - 134-138 pp.
9. Vrins F., Lee J.A., Verleysen M., et al. Improving independent component analysis performances by variable selection. *NNSP'2003 proceedings*, Toulouse (France), 2003. - 359-368 pp.
10. Lathauwer L.De, Moor B.De, Vandewalle J. SVD-Based Methodologies for Fetal Electrocardiogram Extraction. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2000 Vol 6. 2000 IEEE International Conference, 2000. - 3771-3774 pp.
11. Kotas M. Projective filtering of time-aligned beats for foetal ECG extraction. *Bulletin of the polish academy of sciences. technical sciences*. V. 55, No. 4, 2007. - 331-339 pp.
12. Vigneron V., Paraschiv-Ionescu A., Azancot A., et al. Fetal electrocardiogram extraction based on non-stationary ICA and wavelet denoising. *Proceedings. Seventh International Symposium on. ISSPA*. vol.2, 2003. - 69-72 pp.
13. Azzaroni B, Foresta F., Mammone N., Morabito F.C. A New Approach Based On Wavelet-ICA Algorithms For Fetal Electrocardiogram Extraction // *Proc. ESANN'2005*, Bruges (Belgium), 193-198 pp.
14. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ радиотехнических устройств и систем: Учебное пособие для высших учебных заведений.- Москва: Радио и связь, 1991.- 608с.
15. Овсяк В. Синтез і дослідження алгоритмів комп'ютерних систем / В. Овсяк, В. Бритковський, О. Овсяк, Ю. Овсяк – Львів: УАД, 2004. – 276 с.