

**УДК 004.021**

**Олег В'юницький, Вячеслав Шулгін, проф., Олександр Тоцький, проф., Валерій Шаронов, доц.**

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна

### **АНАЛІЗ СЕРЦЕВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПЛОДУ У ХОДІ ВАГІТНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІСПЕКТРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ АБДОМІНАЛЬНИХ СИГНАЛІВ**

Для виявлення серцевої діяльності плоду запропоновано методику оцінки спектру третього порядку, що називається методикою оцінки біспектру сигналу. Для виділення серцевої діяльності плоду пропонується новий клас інформаційних ознак, що оцінюється у вигляді фазово-зв'язаних внесків, які містяться в абдомінальних сигналах, зареєстрованих на материнській черевній поверхні. Експериментальна верифікація запропонованого підходу виконана для абдомінальних сигналів, записаних у реальних людей з вкладами завад. Вклади серцевої діяльності плоду, виділені у біспектральній площині шляхом обчислення оцінок амплітудного біспектру, вказують на фазовий зв'язок між деякими спектральними компонентами, що містяться в абдомінальних сигналах. Проведено аналіз абдомінальних сигналів за допомогою запропонованого методу для пацієнтів, у яких було виявлено гіпоксію плоду. Отримані результати демонструють ефективне придушення інтерференції, що забезпечується за допомогою стратегії обробки сигналів на основі біспектру, та можливість виявлення гіпоксії плоду на ранніх стадіях.

Ключові слова: біомедичні сигнали, серцева діяльність плоду, ЕКГ плода, абдомінальний сигнал, біспектр, оцінка біспектру, QRS комплекс, гіпоксія плода.

### **Oleh Viunytskyi, Vyacheslav Shulgin, Alexander Totsky, Valery Sharonov. ANALYSIS OF THE FETAL HEART ACTIVITY DURING PREGNANCY BY BISPECTRUM-BASED ABDOMINAL SIGNAL PROCESSING**

A method for extraction fetal ECG contribution from abdominal signals and finding information features for detection of fetal hypoxia by bispectrum-based signal processing has been proposed.

Keywords: fetal heart activity, fetal ECG, abdominal signal, bispectrum, QRS complex.

Сьогодні діагностичні системи, призначені для охорони здоров'я дорослих і дітей, активно розвиваються і вдосконалюються. Разом з тим, досягнення в області діагностики функціонального стану плоду у ході вагітності залишаються на досить низькому рівні. Тому розробка нових методів пренатальної діагностики вкрай важлива, оскільки здоров'я людини в майбутньому формується безпосередньо під час вагітності [1] і своєчасне виявлення захворювань може дозволити уникнути великої кількості смертей новонароджених дітей.

Відомо, що характер серцевого ритму плоду є чітким показником його функціонального стану [2]. На сьогоднішній день основним методом дослідження серцевої діяльності плоду є ехокардіографія [2], [3]. Однак, ця методика може бути виконана тільки в умовах лікарні. Набагато більш доступною є ультразвукова кардіотокографія (КТГ) та неінвазивна електрокардіографія плода (NI-FECG) [4] - [6]. З метою підвищення інтерференційної завадостійкості діагностичної системи для дослідження серцевої діяльності плоду, ми пропонуємо використовувати підхід обробки абдомінальних сигналів на основі біспектру, описаний в [7].

Спектр третього порядку або біспектр, на відміну від загального енергетичного спектру, дозволяє не тільки правильно описувати статистичні властивості досліджуваного сигналу, але й вилучати нові інформаційні ознаки у вигляді внесків, обумовлених кореляційними зв'язками та фазовими зв'язками спектральних компонент сигналу. У біспектральній області всі інтерференційні внески з симетричною формою розподілу випадкової величини будуть видалені. В той же час, внесок у площину третього порядку, викликаний сигналами ЕКГ, зберігається, оскільки вони мають несиметричні форми розподілу випадкової величини та містять квадратичні та кубічні нелінійності [8]. Метою даної роботи є пропозиція нової методики для аналізу абдомінальних сигналів, яка дозволить використовувати фазово-частотні кореляційні відносини, що містяться в сигналі, необхідних для аналізу ЕКГ плода. Зауважимо, що зареєстрований абдомінальний сигнал містить численні внески артефактів, такі як інтерференція ліній зв'язку, висока амплітуда материнської ЕКГ в абдомінальному сигналі, рухи плода в утробі, артефакти накладання електродів і електронний шум підсилювача.

У таких умовах ми пропонуємо використовувати біспектральну стратегію для обробки абдомінальних сигналів та виявлення в них внесків скорочень серця плода. Це робить можливим вилучення лише внесків тих спектральних компонентів сигналу, які є фазово-зв'язаними. Решта некорельованих спектральних складових, що належать до інтерференції, будуть зникати за рахунок особливостей біспектру [7].

Оцінку біспектру  $\hat{B}_i(f_1, f_2)$ , розраховану для деякого довільного  $i$ -го короткочасного інтервалу, можна записати як:

$$\hat{B}_i(f_1, f_2) = \hat{S}_i(f_1)\hat{S}_i(f_2)\hat{S}_i^*(f_1 + f_2) \quad (1)$$

де  $\hat{S}_i(\dots)$  – перетворення Фур'є, обчислене для сигналу за допомогою ковзного вікна;  $f_1, f_2$  і  $f_3$  – частоти, що містяться в багатоконтактному абдомінальному сигналі. Комплексну оцінку біспектру, визначену у вигляді (1), можна виразити як:

$$\hat{B}_i(f_1, f_2) = |\hat{B}_i(f_1, f_2)| \exp[j\hat{\phi}(f_1, f_2)] \quad (2)$$

де  $|\hat{B}_i(f_1, f_2)|$  – оцінка амплітудного біспектру;  $\hat{\phi}(f_1, f_2)$  – оцінка фазового біспектру;  $j = \sqrt{-1}$ .

Для того, щоб отримати згладжений біспектр, оціночну процедуру усереднення по ансамблю необхідно виконати у вигляді:

$$\hat{B}(f_1, f_2) = \langle \hat{B}_i(f_1, f_2) \rangle_1, \quad (3)$$

де  $\langle \dots \rangle_1$  позначає процедуру усереднення по ансамблю, виконану за  $i = 1, \dots, I$  короткочасних реалізацій абдомінального сигналу.

Після когерентного накопичення, виконаного згідно з (3), середня оцінка біспектру по ансамблю служить для вилучення внесків серцевої діяльності плода. Високий рівень значення в (3) вказує на фазовий зв'язок для частот  $f_1, f_2$  і  $f_1 + f_2$ . Це може вказувати на те, що частоти  $f_1$  і  $f_2$  мають спільний «генератор», яким виступає серце плода, або що створюється нове коливання з частотою, що дорівнює  $f_1 + f_2$  за рахунок нелінійного взаємодії між коливаннями з частотами, рівними  $f_1$  та  $f_2$ , якими виступають серце плода та серце вагітної жінки.

Декілька із типових абдомінальних записів, виконаних системою BabyCard [9], були обрані для дослідження з використанням запропонованого підходу. Більш

детальну інформацію про систему і параметри сигналу можна прочитати за посиланням [9] - [10]. Частота дискретизації сигналу становить 1000 Гц. Сигнали в роботі задаються у відносних значеннях без посилання на частоту дискретизації і амплітуду сигналів у мВ.

З метою мінімізації внеску материнської ЕКГ в оцінку біспектру абдомінального сигналу, сигнали розподілялися на окремі фрагменти від початку QRS комплексу материнської ЕКГ до початку наступного. Для вилучення інформації про наявність фетальних QRS комплексів, що містяться в отриманому фрагменті сигналу, останній фрагмент повинен бути розділений на чотири сегменти. Приклад фрагмента абдомінального сигналу в одному каналі, де чотири сегменти позначені як I, II, III і IV та позначені чотирма перпендикулярними лініями, показаний на рисунку 1.

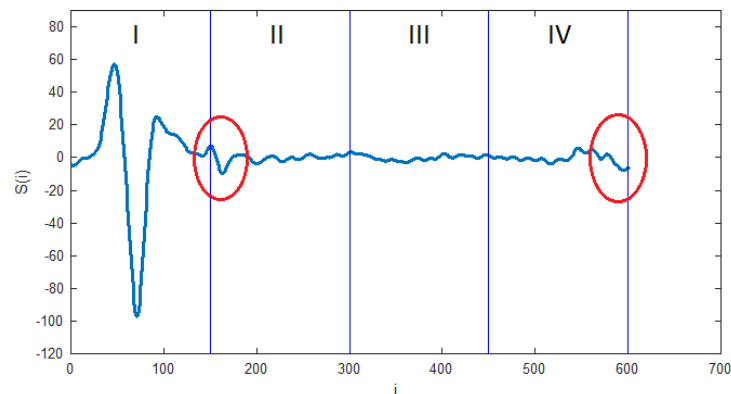


Рис. 1. Фрагмент абдомінального сигналу в одному каналі розділений на чотири сегменти

Вклади серцевої діяльності плода відзначені двома кольоровими овалами, розташованими в межах сигнального фрагмента. З рисунку 1 видно, що перше скорочення серця розташоване безпосередньо на межі першого і другого сегментів сигналу. Друге скорочення серця плода знаходиться в четвертому сегменті. Для кожного сегменту розраховується величина біспектру (1), після чого відбувається усереднення біспектрів усіх сегментів (3) впродовж всього запису сигналу, результатом якого є одна усереднена матриця біспектру. Оскільки сигнали реєструються у шести відведеннях, то після усереднення (3) результатом виконання є шість матриць біспектру. Наступним кроком – є усереднення шести усереднених біспектрів для кожного із шести каналів між собою. На рисунку 2 показані усереднені біспектри для здорового плода (а), для того самого плода з ймовірною наявністю гіпоксії (б), та для того самого плода з точною наявністю гіпоксії (в).

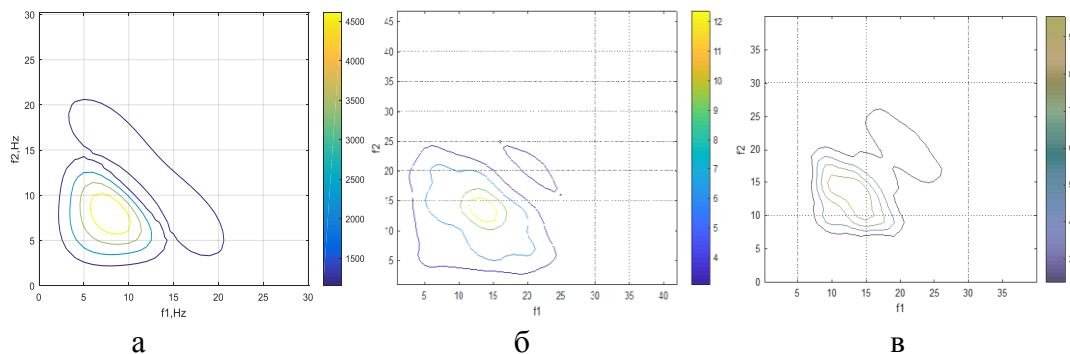


Рис. 2. Приклади усереднених біспектрів для одного і того самого плода без гіпоксії (а), з ймовірною гіпоксією (б), та з гіпоксією (в).

Сигнали реєструвались на різному етапі вагітності однієї жінки, а наявності гіпоксії був установлений лікарем. З рисунку 2 видно, що при початковому прояві гіпоксії (б), відбувається зміщення максимуму амплітудного біспектру. На рисунку 2,(а) максимум знаходиться на частоті

8 Гц, а на рисунку 2,(б) він змістився на частоту 14 Гц, на рисунку 2,(в) максимум амплітудного біспектру змістився на частоту 15 Гц. На частоті 20...25 Гц з'являється нова спектральна компонента. Таким чином, поява нової спектральної компоненти на частоті 20...25 Гц, а також зміщення максимуму амплітудного біспектру з частот 6...10 Гц на частоті 14...16 Гц може вказувати на наявність гіпоксії плоду. Аналіз проводився на 60 пацієнтах, в яких було встановлено наявність гіпоксії плоду. Для 3 пацієнтів є декілька записів, де гіпоксія плоду була відсутня, а потім проявилась – приклад амплітудних біспектрів для такого запису був показаний на рисунку 2. Для інших пацієнтів записи були вже із наявністю гіпоксії, проте максимум амплітудного біспектру для таких записів також знаходився на частоті 14...16 Гц, а на частотах 20...25 Гц була присутня додаткова спектральна компонента.

### **Література**

1. M.T. Donofrio, A.J. Moon-Grady, L.K. Hornberger et. al., “Diagnosis and treatment of fetal cardiac disease”, Scientific Statement From the American Heart Association Circulation., 2014;129, pp. 2183–2242.

2. S. Srinivasan, J. Strasburger, “Overview of fetal arrhythmias”, Curr. Opin. Pediatr., 2008, 20(5), pp. 522–531.

3. Wacker-Gussmann, H. Paulsen, K. Stingl, J. Braendle, R. Goelz, “Atrioventricular conduction delay in the second trimester measured by fetal magnetocardiography”, Journal of Immunology Research, Published online 2014, Jan 16.

4. J. Behar, “Extraction of clinical information from the non-invasive fetal electrocardiogram”, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Michaelmas, 2014, 233 p.

5. J. Behar, T. Zhu, J. Oster, R. Sameni, A.J.Wolfberg, G.D.Clifford, “Evaluation of the fetal QT interval using non-invasive fetal ECG technology”, Institute of Physics and Engineering in Medicine, Printed in the UK Physiol. Meas., 37, 2016, pp. 1392–1403.

6. E. Graatsma, B. Jacod, L. van Egmond, E. Mulder, G. Visser, “Fetal electrocardiography: feasibility of long-term fetal heart rate recordings”, BJOG, 2009, 116, pp. 334–338.

7. Alexander V. Totsky, Alexander A. Zelensky, Victor F. Kravchenko, Bispectral Methods of Signal Processing, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston, 2015, 199p.

8. M. Rizk, M. et al. “Higher-order ambulatory electrocardiogram Identification and motion artefact suppression with adaptive second- and third-order volterra filters,” SPIE '98, Adv. Sign. Proc. Algorithms, Arch. & Implementations VIII vol. 3461, USA, 19-24 July, pp. 417-431.

9. O. Viunytskyi, V. Shulgin, “Signal Processing Techniques for Fetal Electrocardiogram Extraction and Analysis”, IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology, 2017, pp. 325-328.

10. Oleh Viunytskyi, Vyacheslav Shulgin, “Fetal ECG and Heart Rhythm Analyzing Using BabyCard”, Signal Processing Symposium, Jachranka Village, Poland, 2017, pp. 21-24.