УДК 319.216

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ СИНХРОННО ЗАРЕЄСТРОВАНИХ КАРДІОСИГНАЛІВ

А.С. Сверстюк

Тернопільський державний медичний університет імені І.Я.Горбачевського

В роботі представлено аналітичні залежності для імовірнісних характеристик синхронно зареєстрованих кардіосигналів, а також розроблено статистичні методи їх аналізу.

Ключові слова: вектор циклічних випадкових процесів, синхронно зареєстровані кардіосигнали, статистичні методи обробки.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИНХРОННО ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ КАРДИОСИГНАЛОВ

А.С. Сверстюк

Тернопольский государственный медицинский университет имени И.Я.Горбачевского

В работе представлено аналитические зависимости для вероятностных характеристик синхронно зарегистрированных кардиосигналов, а также разработано статистические методы их анализа.

Ключевые слова: вектор циклических случайных процессов, синхронно зарегистрированные кардиосигналы, статистические методы обработки.

THE STATISTIC PROCESSING METHODS OF SYNCHRONOUSLY REGISTERED CARDIOSIGNALS

A.S. Sverstyuk

Ternopil State Medical University named after I.Ya. Horbachevsky

The analytical statistic characteristics relationships of synchronously registered cardiosignals are introduced in this article. The statistic methods of its common analysis are elaborated also.

Key words: vector of cyclic rhythmically related casual processes, synchronously registered cardiosignals, statistic methods of processing.

Вступ. Робота серця як біофізичної системи супроводжується генеруванням електричних, магнітних та механічних (акустичних) полів, що у своїй просторово-часовій структурі відображають функціональний стан серцево-судинної системи людини і дозволяють проводити її діагностику.

Окремо взятий функціональний метод дослідження серцево-судинної системи може дати уявлення переважно лише про одну якусь сторону її активності. Повну інформацію про активність серцево-судинної системи можна отримати лише при умові паралельного використання декількох методів автоматизованої діагностики на базі ЕОМ, а отримані дані повинні розглядатися з єдиної точки зору. На переваги подібного комплексного підходу до діагностики стану серцево-судинної системи вказували автори багатьох наукових робіт медичного спрямування: Куршаков М.А., Кірілов С.А., Лукомський П.Е., Селідовкіна А.А. та ін. Такий підхід дозволяє певним чином як уніфікувати автоматизовану обробку та моделювання різних за фізичною природою кардіосигналів, так і підвищити достовірність, повноту діагностики стану серця внаслідок використання однотипних діагностичних ознак для різних класів кардіосигналів. Сумісний аналіз кардіосигналів можливо проводити лише за умови, що їх математичні моделі є певним чином узгодженими між собою, мають подібну структуру.

Дослідженню аналітичних залежностей для імовірнісних характеристик синхронно зареєстрованих кардіосигналів, а також, розробці методів їх статистичного аналізу присвячена дана робота.

Основна частина. Типовими прикладами синхронно зареєстрованих кардіосигналів є синхронно зареєстровані електрокардіограма (ЕКГ) та реограма, полікардіограма (ЕКГ, апекскардіограма (АКГ) та фонокардіограма (ФКГ)) та ін. На рисунках 1, 2 наведені приклади таких сигналів.

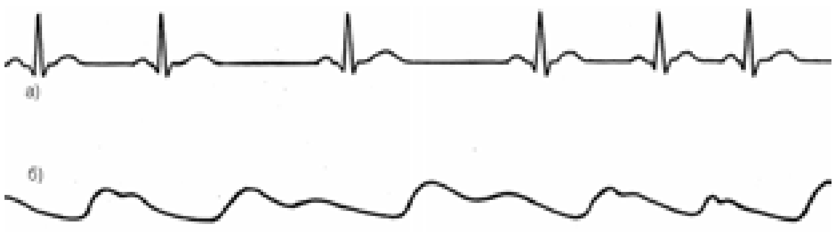

Рис. 1. **Синхронно зареєстровані сигнали: а) ЕКГ; б) реоенцефалограма.**

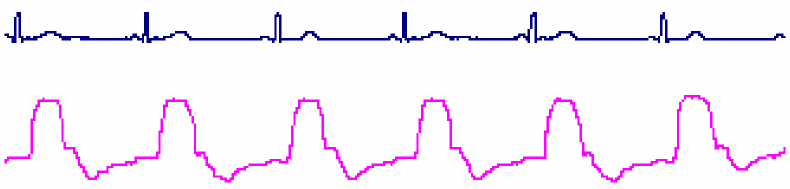

Рис. 2. **Синхронно зареєстровані сигнали: а) ЕКГ; б) АКГ.**

В роботі [1] дано означення циклічних випадкових функцій як математичних моделей широкого класу коливних явищ та систем. Зокрема, в роботі дано означення ритмічної та періодичної пов'язаності циклічних випадкових процесів. Такі процеси можуть ефективно застосовуватися при моделюванні та сумісному статистичному аналізі синхронно зареєстрованих циклічних сигналів.

З метою розробки методів сумісного статистичного аналізу кардіосигналів дамо означення вектора ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів, згідно [1], які можуть використовуватися, як модель вектора синхронно зареєстрованих кардіосигналів.

Означення 1. Вектор $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних випадкових процесів $\{\xi_i(\omega, t)$, $i=1,N$, $\omega \in \mathbf{\Omega}$, $t \in \mathbf{R}\}$ будемо називати вектором строго ритмічно пов'язаних випадкових процесів, а самі процеси строго ритмічно пов'язаними, якщо існує така функція ритму $T(t,n)$, яка задовольняє умови (1) і (2), що скінченновимірні вектори $\{\xi_{i_1}(\omega, t_1), \{\xi_{i_2}(\omega, t_2),\ldots,\{\xi_{i_p}(\omega, t_p)\}$, та $\{\xi_{i_1}(\omega, t_1+T(t_1,n)),\{\xi_{i_2}(\omega, t_2+T(t_2,n)),\ldots,\{\xi^p_{i_p}(\omega, t_p+T(t_p,n))\}$ $n \in \mathbf{Z}$, $i_1,\ldots,i_p = \overline{1,N}$, де $\{t_1,\ldots,t_p\}$ – множина сепарабельності вектора $\Theta_N(\omega, t)$, при всіх цілих $p \geq 1$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні.

Функція ритму $T(t,n)$ визначає закон зміни часових інтервалів між однофазними значеннями циклічної функції.

Функція $T(t,n)$ повинна задовольняти таким властивостям.

1. Вона задана на всій дійсній осі $t \in \mathbf{R}$ і на всій множині цілих чисел, і рівна нулю коли $n = 0$. В решта випадках вона або додатна або від'ємна, тобто:

a) $T(t,n) > 0$, якщо $n > 0$;
b) $T(t,n) = 0$, якщо $n = 0$;
c) $T(t,n) < 0$, якщо $n < 0$. (1)

2. Для будь-яких $t_1 \in \mathbf{R}$ та $t_2 \in \mathbf{R}$, для яких $t_2 > t_1$ для функції $T(t,n)$ виконується нерівність:

$$t_1 + T(t_1,n) < t_2 + T(t_2,n),\ \forall n \in \mathbf{Z}. \quad (2)$$

У частинному випадку, якщо функція ритму $T(t,n) = n \cdot T$ ($T > 0, n \in \mathbf{Z}$), то вектор $\Theta_N(\omega, t)$ будемо називати вектором T – періодично пов'язаних випадкових процесів.

Розглянемо властивості імовірнісних характеристик вектора $\Theta_N(\omega, t)$ ритмічно та періодично пов'язаних циклічних випадкових процесів.

Так, для його сумісної p- вимірної функції розподілу має місце рівність:

$$F_{p_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_p}}}(x_1,\ldots,x_p;t_1,\ldots,t_p) = \quad (3)$$
$$= F_{p_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_p}}}(x_1,\ldots,x_p;t_1+T(t_1,n),\ldots,t_p+T(t_p,n)),\ n \in \mathbf{Z},\ i_1,\ldots,i_p =$$
$$= \overline{1,N},\ t_1,\ldots,t_p \in \mathbf{R}.$$

Якщо існує сумісна щільність розподілу вектора $\Theta_N(\omega, t)$, то для неї має місце рівність, що аналогічна рівності (3).

Змішана центральна моментна функція порядку $k = \sum_{l=1}^{p} R_l$:

$$r_{k_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_p}}}(t_1,\ldots,t_p) =$$
$$= \mathbf{M}\left\{\left(\xi(\omega,t_1) - m_{\xi_{i_1}}(t_1)\right)^{R_1} \cdot\ldots\cdot \left(\xi(\omega,t_p) - m_{\xi_{i_p}}(t_p)\right)^{R_p}\right\} = \quad (4)$$
$$= r_{k_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_p}}}(t_1+T(t_1,n),\ldots,t_p+T(t_p,n)),\ t_1,t_2,\ldots,t_p \in \mathbf{R},\ i_1,\ldots,i_p =$$
$$= \overline{1,N},\ n \in \mathbf{Z}.$$

Розглянемо питання статистичного оцінювання сумісних імовірнісних характеристик вектора ритмічно та періодично пов'язаних циклічних випадкових процесів. Нехай маємо вектор $\Theta_N(\omega, t)$ ритмічно пов'язаних неперервних циклічних випадкових процесів $\{\xi_{i_1}(\omega, t_l), i = \overline{1,N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$ із функцією ритму $T(t,n)$ та реалізацію $\Theta_N(\omega, t)$ вектора $\Theta_N(\omega, t)$, тобто множину реалізацій $\{\xi_{i\omega}(t), i = \overline{1,N}, t \in \mathbf{R}\}$. Нехай маємо моменти часу t_m та t_{m+1}, що відповідають початку та кінцю m-го циклу випадкового вектора $\Theta_N(\omega, t)$, тобто маємо область визначення m-го $W_m = [t_m, t_{m+1}]$ циклу. Запишемо вирази, що вказують на збіжність за імовірністю статистичних оцінок до оцінюваних сумісних імовірнісних характеристик, і які лежать в основі методів статистичного оцінювання сумісних імовірнісних характеристик вектора $\Theta_N(\omega, t)$ ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів.

Оцінка, що збігається до змішаної центральної моментної функції порядку $k = \sum_{l=1}^{p} R_l$:

$$r_{k_{\xi_{i_1} \ldots \xi_{i_p}}}(t_1, \ldots, t_p) = \tag{5}$$

$$= \lim_{M \to \infty} \frac{1}{2M} \cdot \sum_{n=-M}^{M} \left[\begin{array}{l} \left(\xi_{i_{1\omega}}(t_1 + T(t_1, n)) - m_{\xi_{i_1}}(t_1 + T(t_1, n)) \right)^{R_1} \\ \cdot \ldots \cdot \left(\xi_{i_{p\omega}}(t_p + T(t_p, n)) - m_{\xi_{i_p}}(t_p + T(t_p, n)) \right)^{R_p} \end{array} \right],$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_m, t_2, \ldots, t_p \in \mathbf{R}.$$

При $p=2$, $k=2$, $r_{2\,\xi_{i_1}\xi_{i_2}}(t_1,t_2)$, $t_1 \in W_m$, $t_2 \in \mathbf{R}$ – взаємна кореляційна функція циклічних випадкових процесів $\xi_1(\omega, t)$ та $\xi_2(\omega, t)$ на області $\mathbf{W}_m \times \mathbf{R}$.

Записані вище статистичні оцінки дозволяють оцінити змішані моментні функції вектора ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів не на всій області їх визначення, а лише на області $\mathbf{W}_m \times \mathbf{R}^{p-1}$. Легко показати, що оцінки p-вимірних змішаних моментних функцій достатньо знати на області $\mathbf{W}_m \times \mathbf{R}^{p-1}$, щоб за відомою функцією ритму отримати їх значення на всій області $(\mathbf{R}^p)$ визначення статистики.

Результати статистичного аналізу синхронно зареєстрованих кардіосигналів на базі їх математичної моделі у вигляді періодичного та вектора циклічних випадкових процесів.

З метою перевірки адекватності нової математичної моделі та методів статистичної обробки реальним синхронно зареєстрованим циклічним сигналам серця, а також для підтвердження більшої ефективності обробки кардіосигналів у порівнянні із методами обробки, які базуються на відомій моделі у вигляді стохастично періодичного випадкового процесу, було проведено серію експериментів по обробці кардіосигналів різної фізичної природи, зокрема, ЕКГ та АКГ.

На рисунку 3 подано графік оцінки взаємної кореляції ЕКГ та АКГ при їх обробці на основі моделі стохастично періодичного процесу. Як видно з цього рисунку відбувається суттєве спотворення статистичної інформації – проявляється так званий ефект „розмивання", що обумовлений неврахуванням зміни ритму кардіосигналів в їх моделі стохастично періодичного процесу.

На рисунку 4 подано графік оцінки взаємної кореляції ЕКГ та АКГ при їх обробці на основі нової математичної моделі у вигляді вектора циклічних випадкових процесів. Як видно з цього рисунка нові методи статистичної обробки кардіосигналу суттєво усувають явище „розмивання" статистичних оцінок, оскільки вони враховують мінливий характер ритму кардіосигналу.

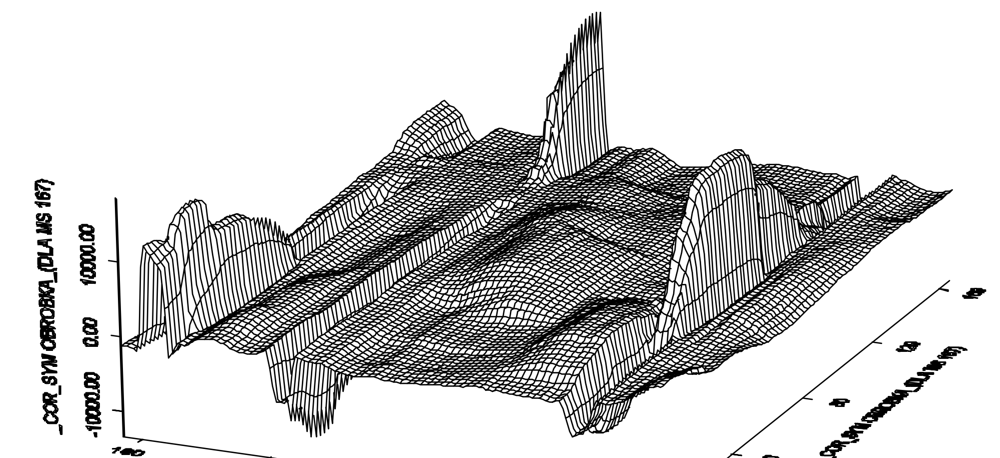

Рис. 3. **Статистична оцінка змішаної кореляційної функції ЕКГ та АКГ (отримані усередненням через період T=668).**

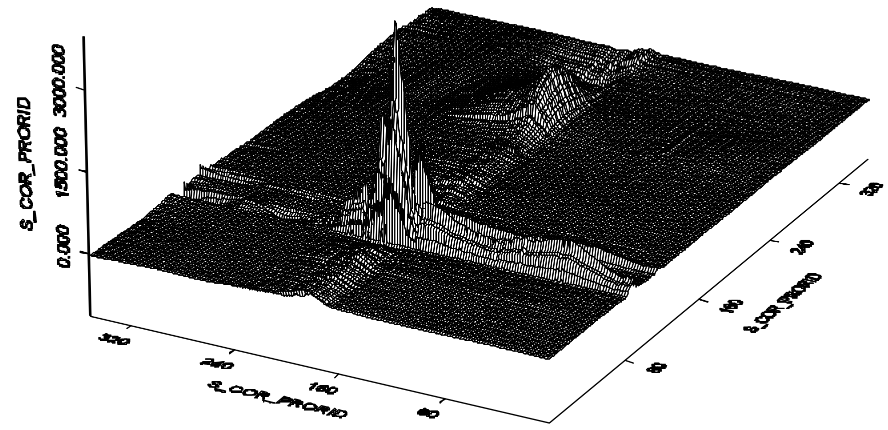

Рис. 4. **Статистична оцінка змішаної кореляційної функції ЕКГ та АКГ (отримані з врахуванням функції ритму).**

Висновки. Записано аналітичні залежності та розроблено методи статистичного оцінювання сумісних імовірнісних характеристик ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів, що дає змогу проводити аналіз синхронно зареєстрованих реальних циклічних сигналів із однаковою ритмічною структурою або які породжуються однією і тією ж коливною системою. Відмітимо, що розроблені статистичні методи можна застосувати за умови, що відома функція ритму вектора ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів.

В подальших дослідженнях необхідно обгрунтувати нові діагностичні ознаки, що базуються на отриманих статистичних оцінках, з використанням функції ритму, а саме:

1. Провести мінімізацію розмірності діагностичних просторів.

2. Оцінити повноту, незалежність, чутливість до зміни стану системи та не чутливість до дії випадкових факторів діагностичних ознак.

Література

1. Лупенко С. Циклічні випадкові функції в задачах моделювання циклічних сигналів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - Хмельницький: Навчальна книга. – 2005. - №1. - С. 132-139.
2. Лупенко С. Статистичні методи сумісної обробки сукупності ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - Хмельницький: Навчальна книга. – 2005. - №1. - С. 80-84.
3. Лупенко С., Студена Ю. Математичне моделювання сигналів серця в задачах технічної кардіометрії на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу // Вісник Тернопільського державного технічного університету.- 2006. -Т. 11, №1. -С.134-142.