Ритмоадаптивне опрацювання циклічних біомедичних сигналів

Р. Буцій[1]

[1]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ, Україна

romanbutsiy@gmail.com

На сьогодні актуальними є завдання підвищення точності опрацювання біомедичних сигналів, зокрема електроенцефалографічних (EEG) та електрокардіографічних (ECG). Не зважаючи на існування багатьох підходів, математичних моделей, методів та програмно-апаратних засобів опрацювання біомедичних сигналів. Існуючі математичні моделі недостатньо ефективно враховують циклічну структуру і ритмічні особливості цих сигналів, що знижує точність розпізнавання ментальних керуючих сигналів у нейроінтерфейсах [1, 2] та обмежує потенціал діагностичних і біометричних застосувань ECG [3]. Тому актуальною є розробка нових моделей, здатних адекватно відображати ці характеристики біосигналів.

Запропонована модель дозволяє враховувати такі ключові характеристики біосигналів, як стохастичність, циклічність та мінливість ритму. Використання даної моделі є перспективним для вирішення задач розпізнавання ментальних керуючих сигналів у неінвазивних нейроінтерфейсах на базі векторного EEG, а також для задач медичної діагностики та біометричної аутентифікації на основі ECG-сигналів. Крім того, модель демонструє універсальність та може бути ефективно застосована для інших типів серцевих сигналів (фотоплетизмографічних – PPG, сейсмокардіографічних – SCG).

Згідно з визначеннями, наведеними у працях [1, 4, 5], циклічний випадковий процес у нашому контексті визначається наступним чином.

Означення 1. Нехай $\xi(\omega,t), \omega \in \Omega, t \in \mathbb{R}$ — випадковий процес, який називається циклічним випадковим процесом, якщо існує така функція ритму $T(t,n), t \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{Z}$, що задовольняє умови (1)–(3), і для будь-яких $t_1, ..., t_k$ з множини роздільності процесу $\xi(\omega,t)$ справджується стохастична еквівалентність у широкому сенсі таких векторів: $(\xi(\omega,t_1),\ldots,\xi(\omega,t_k))$ та $(\xi(\omega,t_1+T(t_1,n)),\ldots,\xi(\omega,t_k+T(t_k,n)))\,, \quad \forall n \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{N}$.

Функція ритму $T(t,n), t \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{Z}$ має такі властивості:

1.
$$\begin{cases} T(t,n) > 0 \; (T(t,1) < \infty), t \in \mathbb{R},\; if\; n > 0, \\ T(t,n) = 0,\; t \in \mathbb{R},\; if\; n = 0, \\ T(t,n) < 0,\; t \in \mathbb{R},\; if\; n < 0. \end{cases} \tag{1}$$

2. для будь-яких $t_1 \in \mathbb{R}$ та $t_2 \in \mathbb{R}$, для яких $t_1 < t_2$, і для функції $T(t,n)$ виконується строга нерівність:

$$T(t_1,n) + t_1 < T(t_2,n) + t_2, \quad \forall n \in \mathbb{Z}; \tag{2}$$

3. функція $T(t,n)$ є найменшою за модулем ($|T(t,n)| \le |T_\gamma(t,n)|$) серед усіх функцій $\{T_\gamma(t,n), \gamma \in \mathbb{N}\}$, що задовольняють умови (1) та (2), а саме:

$$|T(t,n)| = \min_{\gamma\in\mathbb{N}}\{|T_\gamma(t,n)|, \gamma \in \mathbb{N}\}, \quad t \in \mathbb{R}, \quad n \in \mathbb{Z}. \tag{3}$$

Функція ритму визначає інтервали між однофазними значеннями циклічного випадкового процесу. У разі $T(t,n) = n \cdot T, T = const > 0$ процес має регулярний ритм (циклостаціонарний процес). Якщо $T(t,n) \neq n \cdot T$, то ритм є нерегулярним (змінним).

Для k-вимірної функції розподілу $\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbb{R}$ справедлива рівність:

$$F_\xi^k(x_1, ..., x_k, t_1, ..., t_k) = F_\xi^k(x_1, ..., x_k, t_1 + T(t_1, n), ..., t_k + T(t_k, n)). \tag{4}$$

Початкові та центральні моментні функції задовольняють рівності:

$$C_\xi^p(t_1, ..., t_k) = C_\xi^p(t_1 + T(t_1, n), ..., t_k + T(t_k, n)), \tag{5}$$

$$R_\xi^p(t_1, ..., t_k) = R_\xi^p(t_1 + T(t_1, n), ..., t_k + T(t_k, n)). \tag{6}$$

Дискретні за параметром циклічні випадкові процеси можуть бути вкладені в неперервні з відповідними множинами дискретності. Детальні визначення та доведення наведені в роботах [4, 5]. Для оцінки ритмоадаптивних статистичних характеристик біомедичних сигналів використовуються оцінки моментних функцій:

$$\hat{m}_\xi^k(t) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \xi^k(t + T(t,n)), \quad t \in \mathbb{W}_{c_1} = [d_1, d_2). \tag{7}$$

Зокрема, при $k = 1$ отримується оцінка математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t)$. Оцінка центральних моментних функцій має вигляд:

$$\hat{d}_\xi^k(t) = \frac{1}{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} \left[\xi(t + T(t,n)) - \hat{m}_\xi(t + T(t,n))\right]^k, \quad t \in \mathbb{W}_{c_1} = [d_1, d_2). \tag{8}$$

Запропонована математична модель циклічних випадкових процесів дозволяє ефективно враховувати основні характеристики біомедичних сигналів: циклічність, стохастичність мінливість та спільність ритму. Завдяки ритмоадаптивним статистичним оцінкам, дана модель суттєво підвищує точність опрацювання сигналів, що робить її ефективною для застосування в нейроінтерфейсах, діагностичних системах та біометричних технологіях, включаючи обробку сигналів різної фізичної природи (EEG, ECG, PPG, SCG тощо).

1. Lupenko S.; Butsiy R.; Shakhovska N. Advanced Modeling and Signal Processing Methods in Brain–Computer Interfaces Based on a Vector of Cyclic Rhythmically Connected Random Processes. Sensors, 2023, 23, 760.
2. Butsiy R.; Lupenko S. Comparative Analysis of Neurointerface Technologies for the Problem of Their Reasonable Choice in Human-Machine Information Systems. Sci. J. TNTU (Tern.), 2020, 4, 135–148.
3. Lupenko S.; Butsiy R. Express Method of Biometric Person Authentication Based on One Cycle of the ECG Signal. Sci. J. TNTU (Tern.), 2024, 113, 100–110.
4. Lupenko S.; Butsiy R. Isomorphic Multidimensional Structures of the Cyclic Random Process in Problems of Modeling Cyclic Signals with Regular and Irregular Rhythms. Fractal Fract., 2024, 8, 203.
5. Lupenko S. Rhythm-adaptive statistical estimation methods of probabilistic characteristics of cyclic random processes. Digital Signal Process., 2024, 151, 104563.