

ОПТИМАЛЬНА ОБРОБКА ЕЛЕКТРОРЕТИНОСИГНАЛУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ЕЛЕКТРОРЕТИНОГРАМИ

© Ткачук Роман, 2009

Державний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56, Тернопіль, Україна

Vmp@tu.edu.te.ua

На базі лінійної математичної моделі електроретиносигналу (ЕРС) побудовано метод його оптимальної цифрової обробки для визначення форми електроретинограми (ЕРГ) при офтальмодіагностиці. Розроблено метод синтезу оптимального цифрового фільтру ЕРС. Визначено характеристику передачі фільтру, вибрано його структуру і побудовано метод розрахунку параметрів цієї структури. Наведено результати комп'ютерного моделювання оптимальної обробки ЕРС та її характеристики.

Используя линейную математическую модель электроретиносигнала. Разработан метод синтеза оптимального цифрового фильтра и предложен расчет его параметров. Приведены результаты компьютерного моделирования оптимальной обработки ЭРС и его характеристики.

On the base of the linear stochastic discreet process as a mathematics model of an electroretinosignal a digital electroretinosignal processing method for ophthalmodiagnostic estimation of the electroretinogram has been built. A method of an optimal digital filter synthesis has been developed. The filters transfer function determined, the structure selected and a method of its parameters estimation is given. Results of computing simulation of the optimal digital processing of the electroretinosignal are lay down.

Вступ. Ретинографічні методи медичних досліджень візуальної системи людини базуються на інтерактивному чи автоматизованому відборі і аналізові електроретинограми (ЕРГ) [1]. При цьому форму та динамічний діапазон інтенсивності світлового стимулу візуальної системи для виклику появи на сітківці ока електроретиносигналу (ЕРС) намагаються вибрати такими, щоби досягнути якнайменшого впливу на пацієнта, без виникнення збурення та забезпечити належне відтворення ЕРГ. Оскільки тоді візуальна система та ЕРС адекватно представляються лінійними математичними моделями, це спрощує побудову та аналіз ЕРГ [2]. Але специфічні для біосигналу шуми, артефакти та завади, незважаючи на додаткові спеціальні заходи при конструюванні електродів для відбору зі сітківки ока ЕРС, його відповідну обробку, все-таки зменшують роздільну здатність та точність побудови ЕРГ за відібраним ЕРС. Це є вагомою причиною недостатнього використання та незадовільних результатів застосування ЕРГ-методів [1].

Артефакти, шуми є евентуальними, імпульсними, стохастичними завадами.

Під час інтерактивних досліджень їх опрацьовують шляхом візуального аналізу відібраного і переданого ЕРС. Задача автоматизованого опрацювання артефактів близька за змістом до відомих задач фільтрації із суміші сигналу та шуму і розв'язується застосуванням фільтра, характеристики якого синтезують методом ковзного середнього. Проте у даному випадку умова задачі ускладнюється необхідністю не тільки побудувати зі суміші ЕРС та артефакту ЕРГ, але й оцінити наскільки ймовірно отриманий сигнал відтворює ЕРГ з потрібною точністю. Подібні задачі розв'язуються методами статистичної теорії вибору рішення зі застосуванням узгодженої (оптимальної у сенсі мінімальної похибки наближення відтвореної ЕРГ до заданої) чи енергетичної (оптимальної у сенсі мінімального значення відношення енергії відтвореної ЕРГ до енергії шуму) фільтрації [3-6].

У цій статті на базі обґрунтованих раніше експериментальних лінійних математичних моделей ЕРС [7-10] досліджуються методи синтезу характеристик оптимально узгодженого з

заданою формою ЕРГ цифрового фільтру ЕРС та побудовано метод оцінювання вірогідності результату фільтрації.

1. Методи цифрової оптимальної обробки ЕРС. На базі лінійної математичної моделі цифрових сигналів (представлених дискретно у часі кодами значень відліків) та кіл (представлених направленими графами) для оптимальної цифрової обробки ЕРС параметри функції передачі повинні забезпечити мінімальне значення середньоквадратичної похибки між отриманою та заданою ЕРГ.

Цифрові кола реалізують низкою методів, базованих на виразах [10]:

А) ковзного середнього:

$$\hat{s}_n = \sum_{i=-l}^l a_i x_{n-i}; \quad (1)$$

Б) "згортки": $\hat{s}_n = \sum_{i=1}^N h_i x_{n-i}; \quad (2)$

В) „рекурсії“:

$$\hat{S}(z^{-1}) = \prod_{i=1}^m \frac{\alpha_i(z^{-2} - 1)}{z^{-2} - 2b_{1i}z^{-1} + b_{2i}} X(z^{-1}); \quad (4)$$

Г) прямого-зворотнього перетворення Фур'є $\Phi\{\cdot\}$:

$$\begin{aligned} X(e^{j2\pi mk/N}) &= \Phi\{x_n\}, \\ Y(e^{j2\pi mk/N}) &= H(e^{j2\pi mk/N})X(e^{j2\pi mk/N}), \quad (5) \\ \hat{s}_n &= \Phi^{-1}\{Y(e^{j2\pi mk/N})\}, \end{aligned}$$

де $n = \overline{0, N-1}$, $k = \overline{0, N-1}$, N — кількість відліків, H — функція передачі фільтру, наприклад, (4);

Д) "частотної вибірки" (апроксимація Лагранжа функції передачі), де m — кількість точок апроксимації Лагранжа спектру ЕРГ:

$$\hat{S}(z^{-1}) = (z^{-m} - 1) \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{z^{-2} - 2b_{1i}z^{-1} + b_{2i}} X(z^{-1}) \quad (6)$$

Е) обчислень за відліками прямих (X_1, \hat{S}_1) та віддзеркалених (X_2, \hat{S}_2)

"хвиль" відповідно на вході (X) та виході (\hat{S}) кола з розподіленими параметрами (розрахунок коефіцієнтів таких цифрових „хвилевих“ кіл виконується методом перерахунку коефіцієнтів відповідних аналогових фільтрів або синтезом їх за заданою ЕРГ (X, \hat{S}) — z -перетворення відповідних послідовностей):

$$\begin{aligned} s_1(n) &= x_1(n-1) \cdot a_2 a_6 + x_2(n) a_1 a_3 a_6 \quad (7) \\ s_2(n) &= x_1(n-1) \cdot a_4 a_7 + x_2(n) a_1 a_5 a_7 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^{-1} & A \\ z^{-1} & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}^T; \quad (8)$$

Ж) обчислень методом калманівської фільтрації у просторі деяких змінних стану ЕРС Y_n та відомих збурень Ξ_n візуальної системи, відбраному ЕРС X_n , шумах η_n та E_n відбору ЕРС із збуренням візуальної системи, а також матрицях стану A , входу B , виходу C , впливу D та G, F тоді визначаються вектори коефіцієнтів Калмана K й оцінка змінних стану ЕРС \hat{Y} , при яких оцінка ЕРГ \hat{S} має мінімальну дисперсію:

$$\begin{aligned} Y_{n+1} &= AY_n + B\Xi_n + GE_n, \\ X_n &= CY_n + D\Xi_n + FE_n + \eta_n, \quad (9) \\ \hat{Y}_{n+1} &= A\hat{Y}_n + K[X_n - C\hat{Y}_n - D\Xi_n] \end{aligned}$$

На рис. 1 наведено схему застосування фільтру Калмана.

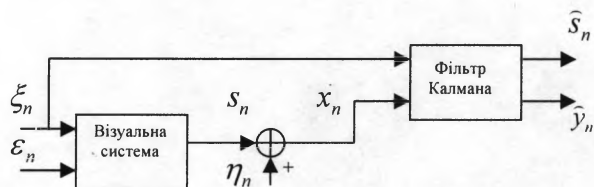


Рисунок 1. Схема застосування фільтру Калмана

Таким чином, для отримання з ЕРС оцінки ЕРГ близької за заданим значенням критерію до заданої ЕРГ необхідно застосувати до ЕРС один з фільтрів (1-8) з

адаптуванням значення його коефіцієнтів. Методом (9) така адаптація передбачається.

2. Адаптація фільтру для оптимальної обробки ЕРС. Вважатимемо, що оцифрований ЕРС має вираз

$$x_n = s_n + \eta_n, \quad (10)$$

де s_n — задана ЕРГ, η_n — шум, $n = \overline{1, N}$. У результаті оптимальної обробки ЕРС x_n отримуємо оцінку \hat{s}_n , близьку до заданої ЕРГ.

2.1 Пряме адаптування коефіцієнтів. Характеристику оптимальної обробки фільтру, заданого одним з виразів (2-8), отримаємо шляхом адаптації їх коефіцієнтів за схемою, наведеною на рис.2.



Рисунок 2. Схема адаптивного фільтру

Наприклад, коефіцієнти b_1 і b_2 , початкові умови x_{-1}, x_{-2} та кількість відліків ЕРС N для структури цифрового кола (В) різницевого оператора, яка є фільтром з характеристикою передачі (4) для $m = 1$

$$\hat{S}(z^{-1}) = \frac{1}{z^{-2} - 2b_1 z^{-1} + b_2} X(z^{-1}), \quad (11)$$

та визначаються такими, щоби послідовність \hat{s}_k на виході фільтра була близькою до заданої послідовності s_k при подаванні на вхід ЕРС $x_k, k = \overline{1, N}$:

$$\operatorname{argmin}_{\forall \{b_1, b_2, x_{-1}, x_{-2}, N\}} K(s, \hat{s}), \quad (12)$$

де

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s_k - \hat{s}_k)^2} \quad (13)$$

критерій близькості. Адаптація параметрів (11), рис. 2, виконується, наприклад, вибором коефіцієнтів методом простого, направленою перебору. Граничні значення коефіцієнтів та початкових умов, крок їх зміни вибирається евристично, зі застосуванням розрахункових залежностей між коефіцієнтами b_1 і b_2 , початковими умовами x_{-1}, x_{-2} та параметрами послідовності s_n — заданої (стандартної) ЕРГ (наведеної в [1], рис.1). У процесі адаптації отримуються коефіцієнти, для яких виконується умова (12). Їх визначають за номерами приростів коефіцієнтів та їх початковими значеннями при мінімумі середньо-квадратичної похибки (13).

2.2 Рекурсивне адаптування. Метод калманівської фільтрації при апіорних відомостях про збурення ξ_n візуальної системи та відібраний її відгук x_n , автокореляційні та взаємкореляційні функції шумів ε_n та η_n уможливорює визначення матриці коефіцієнтів підсилення K , за допомогою яких визначаються оцінки змінних стану ЕРС та їх дисперсія. Ці обчислення повторюються до досягнення прийняттого значення цієї дисперсії. Коефіцієнти K визначаються процедурою, на кожному кроці якої розв'язується рівняння Ріккаті (складене з використанням так званого оновлюючого шуму), або методом статистичної теорії вибору рішення (коли задавалися відповідні функції густини розподілу).

Для означення матриць у виразах (9) та змінних стану ЕРС Y , та елементів та компонентів використано їх різницеву модель ЕРГ експерименту [10]:

$$\begin{cases} Y_{n-1} = AY_n + B\xi_n, \\ X_n = CY_n + D\varepsilon_n + \eta_n, \end{cases} \quad (14)$$

де, у термінах калманівської фільтрації, Y_n — деякий вектор стану ЕРГ, Ξ_n — вектор входу, A — матриця стану, B —

матриця входу, C — матриця виходу, D — матриця впливу. При цьому:

$$b_2 s_{n-2} + b_1 s_{n-1} + s_n = \xi_n. \quad (15)$$

Заміною $s_{n-1} = y_n$, $s_{n-2} = y_{n-1}$ отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} s_{n-1} = y_n \\ y_{n-1} = -\frac{1}{b_2} s_n - \frac{b_1}{b_2} y_n + \frac{1}{b_2} \xi_n \end{cases}, \quad (16)$$

звідки

$$Y_{n-1} = \begin{bmatrix} s_{n-1} \\ y_{n-1} \end{bmatrix}, \Xi_n = \begin{bmatrix} \xi_n \\ 0 \end{bmatrix}, Y_n = \begin{bmatrix} s_n \\ y_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{b_2} & -\frac{b_1}{b_2} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{b_2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

й рівняння (15) набере виразу

$$\begin{bmatrix} s_{n-1} \\ y_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{b_2} & \frac{b_1}{b_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_n \\ y_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{b_2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_n \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

Вектор-матричне рівняння

$X_n = CY_n + D\Xi_n$ зі системи (14) набере виразу:

$$x_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_n \\ y_n \end{bmatrix} + |\eta_n|. \quad (19)$$

Оцінка ЕРГ \hat{s}_n визначається з рівнянь:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} s_{n-1} \\ y_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{b_2} & \frac{b_1}{b_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{b_2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_n \\ 0 \end{bmatrix} \\ x_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_n \\ y_n \end{bmatrix} + |\eta_n| \end{cases} \quad (20)$$

як значення s_n з мінімальною дисперсією, наприклад, функцією *kalman* з Matlab.

3. Аналіз результатів. На рис. 3 наведено типову оцінку ЕРГ $\hat{s}_n, n=1, N, N=256$, отриману оптимальною за критерієм (13) фільтрацією (11) адитивної суміші x_n

заданої ЕРГ s_n та білого нормального шуму η_n з нульовим математичним сподіванням і дисперсією рівною одиниці.

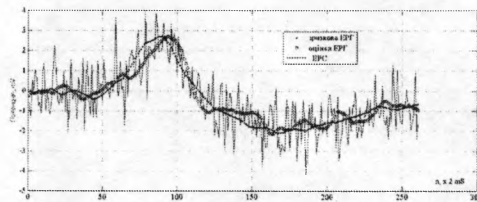


Рисунок 3. Ілюстрація результату оптимальної обробки ЕРС для оцінювання ЕРГ

Вважається, що послідовність x_n отримано з неперервного ЕРС шляхом його подачі на АЦП з вхідним біопідсилювачем з верхньою частотою рівномірної АЧХ 30 Гц та коефіцієнтом підсилення 10^4 ; $n=12$, $f_d = 500$ Гц, $c=15$ мВ [6]. При цьому за початкові значення коефіцієнтів взято $b_1 = 1.9$, $b_2 = 0.9$, крок зміни коефіцієнтів складав 0.000111. Отримано значення коефіцієнтів відповідно 1.9001 та 0.9359 при нульових початкових умовах. В результаті значення середньоквадратичного відхилення було досягнуто $K = 0.0745$.

При завданні ненульових початкових умов (знайдених, наприклад, методом, наведеним у [11,12] для заданої ЕРГ), меншого кроку наближення коефіцієнтів, фільтру вищого порядку, кращого критерію (щоб форма оцінки ЕРГ була точнішою необхідно закладати не „енергетичний” критерій адаптації у сенсі Колмогорова - Вінера, а „узгоджений” — наприклад, у сенсі Норса [13,14]), тоді точність оцінки ЕРГ підвищувалася. Але випадковий характер шуму, завад, артефактів не уможлилював отримання малої дисперсії оцінки методом безпосередньої адаптації коефіцієнтів фільтра. Для зменшення дисперсії оцінки ЕРГ застосовано адаптивний фільтр, у якому цей факт враховано (таким є фільтр Калмана, у якому враховуються статистичні характеристики як вхідних шумів, так і шумів оцінювання) і такий фільтр є достатньо чутливий до адекватності моделі електроретинограми.

Висновки. Дослідження адаптивної оптимальної фільтрації ЕРС, представленого адитивною сумішшю заданої ЕРГ та білого шуму, показало, що для отримання вірогідних оцінок необхідно виконувати оптимальну фільтрацію для кожного ЕРС з ансамблю, тобто, фільтр синтезується для кожного окремого ЕРС.

Необхідно проводити статистичну обробку отриманого ансамблю електроретинограм та визначення вірогідності ЕРГ, отриманої у результаті такої статистичної обробки. Крім того, важливою є задача дослідження оптимізаційних та адаптаційних процедур і визначення їх складності. Постає також задача подальших досліджень математичних моделей ЕРС та їх верифікації на базі отриманих характеристик вірогідності оцінок ЕРГ з одного боку, та з іншого боку побудови методів визначення вірогідності представлення адитивною сумішшю заданої ЕРГ та білого шуму ЕРС.

Література

1. Казарян А.А. Паттерн-ретинограмма и глаукома // Глаукома.- №3, 2005.- С. 62-65
2. Chung-Fang Wu, Fultong Wong Frequency Characteristics in the Visual System of *Drosophila* // *The Journal of General Physiology* Vol.69, 1977, pp. 705-724
3. The Alan E. Lindsay ECG Learning Center in Cyberspace.- Режим доступу.- http://library.med.utah.edu/kw/ecg/ACC_AHA.html .-Заголовок з екрану.
4. *The Scientist and Engineer's Guide for Digital Signal Processing*.- Режим доступу: <http://www.dspguide.com/ch17/3.htm> .- Заголовок з екрану.
5. *Adaptive reduction of motion artifact: Overview*.- Режим доступу: <http://www.eplimited.com/artifact.htm> .- Заголовок з екрану.
6. B. Holl, L. Špilák Digital filtration of artifacts in ECG.- Режим доступу <http://www.urel.feec.vutbr.cz/ra2008/archive/ra2004/abstracts/105.pdf>.- Зоголовок з екрану
7. Marchenko B.G., Tkachuk R.A., Palamar M.I. Computing measuring system for biopotentials of visual analyzer investigations// *Instrumentation in Ecology and Human Safety (IEHS96)*. –St.Peterburg: 1996. -s.114-115.
8. Ткачук Р.А. Фриз М.Є. Математична модель спонтанної електроенцефалограми в задачах офтальмодіагностики по

- зорових викликаних потенціалах// *Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя*.- №2, 1997.- С.17-25.
9. Marchenko B.G., Tkachuk R.A., Palamar M.I. *Harmonic analysis using in human visual system diagnosis by means of electroretinograms identification*// *Pattern recognition and information processing*.- Minsk, 1997.- v.1.- pp. 207-213
10. Юзьків А.В., Яворський Б.І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів//*Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя*.- № 2, 1997.- С. 40-45
11. Яворський Б.И. Цифровой рекурсивный резонатор// *Отбор и передача информации*// *Межвед. сб.- К.: Наук. дум.*, 1985.- Вып. 71.- С. 67-74
12. Яворський Б.И. Цифровой генератор синуса// *Авт.св. СССР № 1092516*.- Бюл. № 18, 1984
13. Троицкий И.Н. *Оптимальная обработка информации*.- М.: Знание, 1990.- 64 с.
14. Orfanidis S.J. *Optimum signal processing: An introduction* .-N.Y.: Macmilan Publishing Company, 1985.- 590 p.