

ОЦІНКА ЧАСТОТИ РАДІОСИГНАЛУ ЗА ВІДГУКАМИ ТРЬОХ СУМІЖНИХ ФІЛЬТРІВ

Фомін М. П.

Кафедра вищої та прикладної математики, Житомирський національний агроекологічний університет,
Житомир, Україна, E-mail: prfomin@mail.ru

Анотація – Запропоновано метод оцінки частоти заповнення імпульсного радіосигналу багатоканальною вимірювальною системою за відгуками трьох суміжних узгоджених фільтрів. Отримано математичний опис алгоритмів оцінок й похибок оцінювання частоти радіосигналу при використанні інформації про величину напруги відгуку на виході двох й/або трьох суміжних фільтрових частотних каналів. Показано зменшення похибок три фільтрового оцінювання порівняно із дво фільтровим.

Ключові слова: Радіосигнал, оцінка частоти, багатоканальна вимірювальна система, узгоджений фільтр, похибка оцінювання частоти.

I. Вступ

У практиці радіолокаційних вимірювань оцінка несучої частоти імпульсних радіосигналів може здійснюватись за допомогою багатоканальної вимірювальної системи, яка утворюється набором частотних каналів із узгодженими фільтрами й детекторами [1].

У роботі [2] для підвищення точності оцінювання пропонується використовувати вихідні напруги декількох фільтрових каналів. З метою зменшення кількості каналів запропоновано використовувати послідовний метод вимірювання частоти радіосигналу – спочатку здійснюється грубе вимірювання частоти радіосигналу, а потім його значення уточнюється шляхом розрахунку поправки. При цьому грубе вимірювання частоти радіосигналу здійснюється за номером частотного каналу, на виході якого відгук сигналу максимальний. Для обчислення поправки частоти запропоновано використовувати максимальний відгук і найбільший із двох сусідніх частотних каналів до максимального. Вихідні сигнали інших частотних каналів при розрахунках поправки не враховуються. Тобто можливості багатоканальної фільтрової вимірювальної системи використовуються не повністю.

II. Алгоритми оцінки частоти радіосигналу

Розглянемо відомий метод оцінки частоти радіосигналу багатоканальною системою із паралельними узгодженими фільтрами [3]. Припустимо, що на вхід багатоканальної вимірювальної системи діє радіосигнал

$$u_c(t) = u(t) \cos(\omega_c t), \quad (1)$$

де $u(t)$ – обвідна радіосигналу;

ω_c – кругова (кутова) несуча частота радіосигналу.

Обвідна радіосигналу $u(t)$ описується формулою

$$u(t) = U_m \cdot \exp\left\{-\frac{t^2}{2\tau_c}\right\}, \quad (2)$$

де U_m – максимальне значення (амплітуда) радіосигналу;
 τ_c – половина тривалості радіосигналу на рівні $\exp\{-0,5\}$ максимального значення U_m .

Спектральна щільність $S_C(\omega)$ такого радіосигналу описується виразом [4]

$$S_C(\omega) = \sqrt{2 \cdot \pi} U_m \tau_c \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_c)^2}{2\tau_c}\right\}. \quad (3)$$

Для зазначеного випадку частотний коефіцієнт передачі $K(j\omega)$ узгодженого фільтра описується виразом

$$K(j\omega) = K_0 \cdot \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_c)^2}{2\Delta\omega_{CM}}\right\}, \quad (4)$$

де $\Delta\omega_{CM}$ – половина смуги пропускання узгодженого фільтра на рівні $\exp\{-0,5\}$ від максимального значення K_0 .

Знайдемо відгук i -го узгодженого фільтра на дію радіосигналу (1) залежно від розстроювання за частотою $\Delta\omega_i = \omega_c - \omega_i$, де ω_i – резонансна частота настройки i -го фільтра.

Комплексна обвідна $\hat{u}_{\text{вих } i}(t)$ вихідного сигналу i -го фільтра при використанні наближеного спектрального методу [4], може бути знайдена за допомогою виразу

$$\hat{u}_{\text{вих } i}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_C(\Omega) K_i[j(\Delta\omega_i + \Omega)] e^{j\Omega t} d\Omega, \quad (5)$$

де $\Omega = \omega - \omega_c$, $K_i[j(\Delta\omega_i + \Omega)] = K[j(\omega_i + \Delta\omega_i + \Omega)]$.

Після відповідних математичних перетворень отримаємо

$$\hat{u}_{\text{вих } i}(t) = \frac{U_m K_0}{\sqrt{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2}} \exp\left\{-\frac{\Delta\omega_i^2}{2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} - \frac{\tau_c^2 \Delta\omega_{CM}^2 t^2}{2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} + j \frac{\Delta\omega_i \tau_c^2}{(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} t\right\} \quad (6)$$

Миттєве значення напруги $u_{\text{вих } i}(t)$ описується виразом

$$u_{\text{вих } i}(t) = \frac{U_m K_0}{\sqrt{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2}} \exp\left\{-\frac{\Delta\omega_i^2}{2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} - \frac{\tau_c^2 \Delta\omega_{CM}^2 t^2}{2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)}\right\} \cos\left(\omega_c t + j \frac{\Delta\omega_i \tau_c^2}{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2} t\right). \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що напруга на виході i -го фільтра u_i залежно від розстроювання за частотою описується такою функцією [4]:

$$u_i = U_m \exp\left\{-\frac{\Delta\omega_i^2}{2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)}\right\} = U_m \exp\{-\alpha \Delta\omega_i^2\}, \quad (8)$$

де $\alpha = [2(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)]^{-1}$.

Наведений результат дає можливість отримувати різні алгоритми оцінки частоти радіосигналу за допомогою багатоканальної фільтрової вимірювальної системи.

Нехай у деякий момент часу через дію на вимірювальну систему сигналу (1) величини напруг на виході трьох суміжних фільтрів відповідно дорівнюють u_{i-1} , u_i й u_{i+1} , причому $u_i > u_{i-1} > u_{i+1}$. Знайдемо оцінку частоти сигналу $\hat{\omega}_{C2}$ за інформацією двох найбільших напруг u_i й u_{i-1} . Для цього використаємо вираз (8) й отримаємо

$$\ln \frac{u_i}{u_{i-1}} = \ln \frac{e^{-\alpha \Delta\omega_i^2}}{e^{-\alpha \Delta\omega_{i-1}^2}} = \alpha (\Delta\omega_{i-1}^2 - \Delta\omega_i^2). \quad (9)$$

Враховуючи, що $\Delta\omega_i = -(\hat{\omega}_{C2} - \omega_i)$, $\Delta\omega_{i-1} = \hat{\omega}_{C2} - \omega_{i-1}$, а $\omega_{i+1} - \omega_i = \omega_i - \omega_{i-1} = \omega_P$ – різниця резонансних частот (рознесення частот) сусідніх фільтрів, отримаємо

$$\hat{\omega}_{C2} = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2} + \frac{1}{2\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i-1}} = \omega_{iP2} + \delta_{\omega 2}, \quad (10)$$

де $\omega_{iP2} = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2}$ – груба оцінка частоти сигналу за резонансними частотами двох сусідніх (i -го та $i-1$ -го) фільтрів з найбільшими вихідними напругами;

$$\delta_{\omega 2} = \frac{1}{2\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i-1}} \quad \text{– поправка оцінки частоти}$$

сигналу, яка розрахована за величиною напруги двох сусідніх фільтрів з найбільшими вихідними напругами.

Загалом оцінка частоти радіосигналу за двома найбільшими вихідними сигналами багатоканальної вимірювальної системи знаходиться як

$$\hat{\omega}_{C2} = \frac{\omega_i + \omega_{i\mp 1}}{2} \pm \frac{1}{2\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i\mp 1}}. \quad (11)$$

Якщо вихідні напруги трьох суміжних фільтрів задовольняють співвідношення $u_i > u_{i-1} > u_{i+1}$, то беруться верхні знаки оцінки (11), а якщо $u_i > u_{i+1} > u_{i-1}$ – то беруться нижні знаки оцінки (11).

Формула (11) описує алгоритм послідовної оцінки частоти радіосигналу багатоканальною вимірювальною системою [2]. Його аналіз показує, що точність оцінки частоти радіосигналу залежить від точності вимірювання вихідних напруг фільтрових каналів u_i , u_{i-1} й u_{i+1} . Якщо відношення сигнал/шум у фільтрових каналах досить велике, то правомірно припустити, що зазначені напруги вимірюються з приблизно однаковою точністю. Тоді, відповідно із [5], середньоквадратична похибка вимірювання частоти за найбільшою напругою двох сусідніх фільтрів дорівнює

$$\sigma_{\omega 2} = \frac{\sqrt{2}}{2\alpha\omega_p} \cdot \frac{\sigma_u}{u}, \quad (12)$$

де $\frac{\sigma_u}{u} = \frac{\sigma_u}{u_i} = \frac{\sigma_u}{u_{i-1}} = \frac{\sigma_u}{u_{i+1}}$ – відносна середньоквадратична похибка вимірювання напруги на виході фільтра.

Розглянемо детальніше як вплине на точність вимірювання частоти радіосигналу інформація про величину напруги на виході третього фільтра. Для цього знайдемо вираз для оцінки частоти радіосигналу $\hat{\omega}_{C3}$ за інформацією з трьох суміжних фільтрів з найбільшими напругами за умови $u_i > u_{i-1} > u_{i+1}$. Використовуючи вираз (8), знайдемо

$$\ln \frac{u_i}{u_{i+1}} = \alpha (\Delta\omega_{i+1}^2 - \Delta\omega_i^2). \quad (13)$$

Тоді оцінка частоти радіосигналу за вихідними напругами першого (більша амплітуда) й третього фільтрових каналів (сама менша амплітуда)

$$\hat{\omega}_{C13} = \frac{\omega_i + \omega_{i+1}}{2} - \frac{1}{2\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+1}}, \quad (14)$$

де перший доданок є грубою оцінкою частоти за величиною резонансної частоти i -го й $i+1$ -го фільтрів, а другий доданок – поправка оцінки частоти сигналу, яка розрахована за величиною напруги цих же суміжних фільтрів.

Оцінкою частоти радіосигналу за найбільшими вихідними напругами трьох суміжних фільтрових каналів можна вважати середнє арифметичне значення частоти оцінки радіосигналу за даними оцінок (10) й (14) $\hat{\omega}_{C3} = (\hat{\omega}_{C2} + \hat{\omega}_{C13})/2$. Тоді, враховуючи що $\Delta\omega_{i+1} = \omega_{i+1} - \hat{\omega}_{C3}$, $\Delta\omega_i = \omega_i - \hat{\omega}_{C3}$, а $\omega_{i+1} = \omega_i + \omega_p$ й $\omega_{i-1} = \omega_i - \omega_p$, отримаємо

$$\hat{\omega}_{C3} = \omega_i - \frac{1}{4\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_{i-1}}{u_{i+1}} = \omega_{iP3} - \delta_{\omega 3}, \quad (15)$$

де $\omega_{iP3} = \omega_i$ – груба оцінка частоти радіосигналу за величиною вихідної напруги трьох фільтрових каналів;

$$\delta_{\omega 3} = \frac{1}{4\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_{i-1}}{u_{i+1}} \quad \text{– поправка оцінки частоти}$$

радіосигналу, розрахована за величиною вихідної напруги трьох суміжних фільтрових каналів.

У загальному випадку

$$\hat{\omega}_{C3} = \omega_i \pm \frac{1}{4\alpha\omega_p} \cdot \ln \frac{u_{i\mp 1}}{u_{i\pm 1}}, \quad (16)$$

де при $u_i > u_{i-1} > u_{i+1}$ беруться верхні знаки, а для ситуації $u_i > u_{i+1} > u_{i-1}$ – беруться нижні знаки виразу (16).

Середньоквадратичні похибки вимірювання частоти радіосигналу за найбільшими вихідними напругами трьох фільтрових каналів визначаються за виразом

$$\sigma_{\omega 3} = \frac{1}{2\alpha\omega_p} \cdot \frac{\sigma_u}{u}. \quad (17)$$

Аналіз виразів (11) й (15) показує, що робота алгоритмів оцінки частоти радіосигналу за вихідними напругами двох й трьох суміжних фільтрів практично однакова. У той же час алгоритм (15) забезпечує середньоквадратичні похибки в $\sqrt{2}$ раз менші.

III. Висновки

Окремий імпульсний радіосигнал створює відгуки на виході декількох суміжних фільтрів багатоканального вимірювача частоти. Використання амплітуди відгуків трьох суміжних узгоджених фільтрів при багатоканальному вимірюванні частоти радіосигналів забезпечує при великому відношенні сигнал/шум зменшення похибок оцінювання в $\sqrt{2}$ раз й не потребує суттєвого ускладнення алгоритму обчислень порівняно із дво фільтровою оцінкою.

IV. Список літератури

- [1]. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
- [2]. Слока В. К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов / В. К. Слока. – М.: Советское радио, 1970. – 256 с.
- [3]. Мирский Г.Я. Электронные измерения / Г.Я. Мирский. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
- [4]. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Советское радио, 1977. – 584 с.
- [5]. Беляевский Л. С. Точность радиоэлектронных измерительных систем / Л. С. Беляевский, В. Г. Черкашин. – К.: Техніка, 1981. – 132 с.

EVALUATION OF RADIOSIGNAL FREQUENCY BY VIEWS THREE CONNECTED FILTERS

NP Fomin

Department of Higher and Applied Mathematics,
Zhytomyr National Agroecological University, Zhitomir,
Ukraine

The method of estimating the frequency of pulse radio signal filling by a multichannel measuring system based on the responses of three adjacent coherent filters is proposed. The mathematical description of the algorithms of estimations and errors of the estimation of the frequency of a radio signal is received at the use of the information on the magnitude of the response voltage at the output of two and / or three adjacent filter frequency channels. The error reduction of three filter evaluations is shown in comparison with the two filter.