

В.В. Омельчук, к.т.н., доц., пров.н.с.

Військова частина, м. Житомир

М.П. Фомін, к.т.н., доц., с.н.с.

Житомирський національний агроекологічний університет

ОЦІНКА ЧАСТОТИ РАДІОСИГНАЛУ ЗА ВІДГУКАМИ ТРЬОХ СУМІЖНИХ ФІЛЬТРІВ

У статті запропонований метод оцінки частоти заповнення імпульсного радіосигналу багатоканальною вимірювальною системою за відгукami трьох суміжних узгоджених фільтрів. Отриманий 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 трифільтрового оцінювання порівняно із двофільтровим.

Постановка проблеми. Актуальність проблеми дослідження. У практиці радіолокаційних та радіомоніторингових вимірювань оцінка несучої частоти імпульсних радіосигналів може здійснюватися за допомогою багатоканальної вимірювальної системи, яка утворюється набором частотних каналів із узгодженими фільтрами й детекторами [1, 2, 3]. Для забезпечення високої точності система, зазвичай, має велику кількість частотних каналів, що дискретно рознесені за частотою в апріорному інтервалі зміни частоти вимірюваного радіосигналу. Проблема підвищення точності оцінювання параметрів радіосигналів у багатоканальних вимірювальних системах є актуальною й цим являє інтерес для фахівців відповідних галузей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] розглядається загальна схема фільтрового багатоканального неслідкуючого вимірювача частоти й пропонується для підвищення точності оцінювання використовувати вихідні напруги декількох фільтрових каналів, але алгоритми оцінювання не наводяться. З метою зменшення кількості каналів у роботі [3] 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. Автори статті [4] запропонували здійснювати вимірювання частоти радіосигналу з використанням перетворювача частота-інтервал часу на основі дисперсійної лінії затримки. Така лінія затримки є досить високотехнологічним складним пристроєм, а необхідність переносу частоти вимірюваного радіосигналу потребує відносно великого часу вимірювань.

Мета статті – розроблення методу оцінки частоти імпульсного радіосигналу багатоканальною системою на основі використання відгуків трьох суміжних узгоджених фільтрів для зменшення похибок вимірювань за рахунок більш повного використання можливостей системи.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо відомий [1, 5] метод оцінки частоти радіосигналу багатоканальною системою із паралельними узгодженими фільтрами. Припустимо, що на вхід багатоканальної вимірювальної системи діє радіосигнал:

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

де $u(t)$ – обвідна радіосигналу; ω_c – кругова (кутова) несуча частота радіосигналу.

Обвідна радіосигналу $u(t)$ описується формулою:

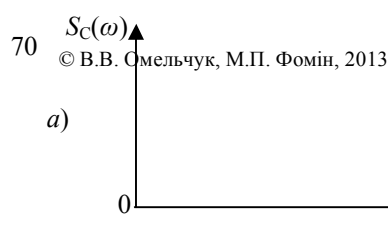
$$u(t) = U_m \cdot \exp\left\{-\frac{t^2}{2 \cdot \tau_c}\right\}, \quad (2)$$

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 (рис. 1, а) описується виразом [6, 7]

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

де $b = \tau_c^{-1} = 1/\tau_c$.



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

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

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

Амплітудно-частотні характеристики фільтрових каналів $K(\omega)$ наведені на рисунку 1, б. 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 $\hat{u}_{вихi}(t)$ вихідного сигналу i -го фільтра при використанні наближеного спектрального методу [6, 8], може бути знайдена за допомогою виразу:

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

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:

$$\hat{u}_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(t) = \frac{U_m \cdot K_0}{\sqrt{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{\Delta\omega_i^2}{2 \cdot (\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} - \frac{\tau_c^{-2} \cdot \Delta\omega_{CM}^2 \cdot t^2}{2 \cdot (\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} + j \frac{\Delta\omega_i \cdot \tau_c^{-2}}{(\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} \cdot t\right\}. \quad (6)$$

Миттєве значення напруги $u_{вихi}(t)$ описується виразом [6, 7]:

$$u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(t) = \frac{U_m \cdot K_0}{\sqrt{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{\Delta\omega_i^2}{2 \cdot (\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)} - \frac{\tau_c^{-2} \cdot \Delta\omega_{CM}^2 \cdot t^2}{2 \cdot (\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2)}\right\} \times \cos\left(\omega_c \cdot t + j \frac{\Delta\omega_i \cdot \tau_c^{-2}}{\tau_c^2 + \Delta\omega_{CM}^2} \cdot t\right). \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що напруга на виході i -го фільтра $u_i(\Delta\omega_i) = u_i$ (рис. 1, в) залежно від розстроювання за частотою описується такою функцією:

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

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

Наведений результат дає можливість отримувати різні алгоритми оцінки частоти радіосигналу за допомогою багатоканальної фільтрової виміральної 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:

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

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:

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

де $\omega_{\Delta \delta 2} = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2}$ – груба оцінка частоти сигналу за резонансними частотами двох сусідніх (i -го й $i-1$ -

го) фільтрів з найбільшими вихідними напругами; $\delta_{\omega 2} = \frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \omega_p} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i-1}}$ – 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:

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

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 [3, 8]. 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 до [9,10], середньоквадратична похибка вимірювання частоти за найбільшою напругою двох сусідніх фільтрів дорівнює:

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

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:

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

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

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

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 оцінок 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:

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

де $\omega_{Гр3} = \omega_i$ – груба оцінка частоти радіосигналу за величиною вихідної напруги трьох фільтрових каналів; $\delta_{\omega3} = \frac{1}{4 \cdot \alpha \cdot \omega_p} \cdot \ln \frac{u_{i-1}}{u_{i+1}}$ – поправка оцінки частоти радіосигналу, розрахована за величиною вихідної напруги трьох суміжних фільтрових каналів.

У загальному випадку:

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

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:

$$\sigma_{\omega3} = \frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \omega_p} \cdot \frac{\sigma_u}{u}. \quad (17)$$

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

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 $\sqrt{2}$ рази й не потребує суттєвого ускладнення алгоритму обчислень, порівняно із двофільтровою оцінкою.

Список використаної літератури:

1. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория : справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – Изд. 2-ое, перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов / В.К. Слока. – М. : Советское радио, 1970. – 256 с.
4. Цыпкун Л.Г. Использование метода сравнения для измерения частоты заполнения радиосигнала / Л.Г. Цыпкун, А.А. Шупта // Измерительная техника. – 1991. – № 8. – С. 43–44.
5. Мирський Г.Я. Електронні вимірювання / Г.Я. Мирський. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.
6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М. : Советское радио, 1977. – 584 с.
7. Радиотехніка : Енциклопедичний навчальний довідник : навч. посібник / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачульського, В.І. Правди. – К. : Вища шк., 1999. – 838 с.
8. Измерение в электронике : справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др. ; под ред. В.А. Кузнецова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
9. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерения / Ф.Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с.
10. Беляевский Л.С. Точность радиоэлектронных измерительных систем / Л.С. Беляевский, В.Г. Черкашин. – К. : Техніка, 1981. – 132 с.

ОМЕЛЬЧУК Валентин Васильович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник відділу військової частини, м. Житомир.

Наукові інтереси:

- космічні інформаційні технології та системи;
- радіолокаційні системи й технології.

ФОМІН Микола Павлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри вищої математики й теоретичної механіки Житомирського національного агроекологічного університету.

Наукові інтереси:

- математичний аналіз радіотехнічних систем.

