УДК 621.396.965:621.391.26

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМАЛЬНОГО ТА КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО ФІЛЬТРІВ ПРИДУШЕННЯ ПАСИВНИХ ЗАВАД

Аверочкін В.О[1]., к.т.н, доц.; Гончаров В.С.[2]
[1,2]Національний університет «Одеська політехніка»
[1,2]Україна, Одеса
[1]ava@op.edu.ua; [2]7733336924@stud.op.edu.ua

Анотація. *Проведено аналіз потенційних характеристик оптимального та квазіоптимального фільтрів придушення пасивних завад радіолокаційному виявленню. Показано, що потенційні характеристики фільтрів що розглядаються практично однакові як по придушенню завад, так і по вихідному відношенню сигнал/завада, однак квазіоптимальний фільтр є простішим при практичній побудові адаптивних систем придушення завад.*

Ключові слова: *радіолокаційне виявлення; пасивні завади; оптимальний та квазіоптимальний фільтри придушення завад.*

Вступна частина. Пасивні завади, що створюються відбиттями від підстилаючих поверхонь, гідрометеорів та оптично непомітних утворень, суттєво обмежують можливості радіолокаційного виявлення. Тому задача побудови систем придушення пасивних перешкод та виявлення сигналів на їхньому тлі було й залишається актуальною [1]. У роботі синтезовано квазіоптимальний фільтр придушення завад та проведено порівняльний аналіз його характеристик із характеристиками оптимального фільтра придушення пасивних завад.

Основна частина. Вектор оптимального фільтру $W_{opt}^T = \left[w_{1opt} \;\; w_{2opt} \right]$ придушення корельованих перешкод у двох суміжних періодах повторення сигналів що зондуються $X^T = \left[x(t) \;\; x(t-T_n) \right] = \left[x_1 \;\; x_2 \right]$ за умови обмеження величиною одного з вагових коефіцієнтів фільтра, $w_{iopt} = 1$ де $(i = 1$ або $2)$ можна знайти шляхом розв'язання оптимізаційної задачі

$$\min_W \left\{ m_1 \left[\left(W^* X \right)^2 \right] \right\} \text{ при } e_i^T W = 1,$$

де $m_1[\cdot]$ – оператор визначення математичного сподівання, $e_1^T = \left[1 \;\; 0 \right]$ та $e_2^T = \left[0 \;\; 1 \right]$.

Використовуючи для розв'язання оптимізаційної задачі метод невизначених множників Лагранжа, можна показати, що лагранжіан, який підлягає оптимізації, у розглянутому випадку має вигляд

$$L(W) = m_1 \left[\left(W^* X \right)^2 \right] - \lambda \left(e_i^T W - 1 \right) = m_1 \left[\left(W^* X \right) \cdot \left(X^* W \right) \right] - \lambda \left(e_i^T W - 1 \right) =$$
$$= m_1 \left(W^* X X^* W \right) - \lambda \left(e_i^T W - 1 \right) = W^* m_1 \left(X X^* \right) W - \lambda \left(e_i^T W - 1 \right) = W^* B_X W -$$
$$- \lambda \left(e_i^T W - 1 \right),$$

де $B_X = \sigma_{in}^2 \begin{bmatrix} 1 & Re^{j\varphi_d} \\ Re^{-j\varphi_d} & 1 \end{bmatrix}$ – коваріаційна матриця завади, σ_{in}^2 – дисперсія завади, R – міжперіодний коефіцієнт кореляції завади, φ_d – міжперіодний набіг допплерівської фази завади, λ – невизначений множник Лагранжа.

Обчислюючи похідну лагранжіана $L(W)$ за вектором фільтру W з урахуванням ермітовості коваріаційної матриці B_X, отримуємо $\frac{\partial L(W)}{\partial W} = 2B_X W - \lambda e_i$.

Прирівнюючи отриману похідну до нуля, визначаємо оптимальний вектор фільтру

$$W_{opt\,i} = \frac{1}{2}\lambda B_X^{-1} e_i .$$

Виходячи з накладеного обмеження $e_i^T W = 1$, визначаємо невизначений множник Лагранжа $\lambda = \frac{2}{e_i^T B_X^{-1} e_i}$ і отримуємо остаточне вираження для оптимального вектору фільтру

$$W_{opt\,i} = \frac{B_X^{-1} e_i}{e_i^T B_X^{-1} e_i} .$$

Аналіз отриманого співвідношення показує, що при $i = 1$ оптимальний вектор фільтру визначається нормованим до $\left(B_X^{-1}\right)_{11}$ першого стовпця матриці B_X^{-1}

$$W_{opt\,1} = \begin{bmatrix} 1 \\ -Re^{-j\varphi_d} \end{bmatrix},$$

а при $i = 2$ оптимальний вектор фільтру визначається нормованим до $\left(B_X^{-1}\right)_{22}$ другим стовпцем матриці B_X^{-1}

$$W_{opt\,2} = \begin{bmatrix} -Re^{j\varphi_d} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Потужність завади на виході синтезованих оптимальних фільтрів визначається співвідношенням $\sigma_{out}^2 = W_{opt\,i}^* B_X W_{opt\,i}$ не залежить від номера i вагового коефіцієнта фільтра, на який накладається обмеження щодо його величини, дорівнює $\sigma_{out}^2 = \sigma_{in}^2\left(1 - R^2\right)$ і не залежить від міжперіодного допплерівського набігу фази завади.

В умовах апріорної невизначеності щодо параметрів діючих завад та використання байєсівського підходу до її подолання побудова адаптивних фільтрів, що відповідають синтезованим вище оптимальним фільтрам, пов'язана з необхідністю отримання надійних оцінок міжперіодного коефіцієнта кореляції $\hat{R}$ та міжперіодного набігу доплерівської фази $\hat{\varphi}_d$.

Відомо [2, 3], що типові для практики значення міжперіодного коефіцієнта кореляції пасивних завад $R = 0.9 \ldots 0.99 \approx 1$, тому в якості квазіоптимальних фільтрів придушення завад можуть бути використані фільтри, вектори вагових коефіцієнтів яких визначаються співвідношеннями

$$W_{q\,opt\,1} = \begin{bmatrix} 1 \\ -e^{-j\varphi_d} \end{bmatrix} \text{ и } W_{q\,opt\,2} = \begin{bmatrix} -e^{j\varphi_d} \\ 1 \end{bmatrix}$$

і передбачають простішу реалізацію в адаптивному режимі. При цьому потужність завади на виході квазіоптимальних фільтрів не залежить від номеру i вагового коефіцієнта фільтру, на який накладається обмеження щодо його величини, дорівнює $\sigma_{q\,out}^2 = 2\sigma_{in}^2\left(1 - R\right)$ і не залежить від міжперіодного доплерівського набігу фази завади φ_d.

Практична частина. За наведеними вище співвідношеннями у середовище MATLAB проведені розрахунки виграшів розглянутих фільтрів у потужності завади на виході в

порівнянні з її потужністю на вході при різних міжперіодних коефіцієнтах кореляції завади. Результати розрахунків наведені на рис. 1.

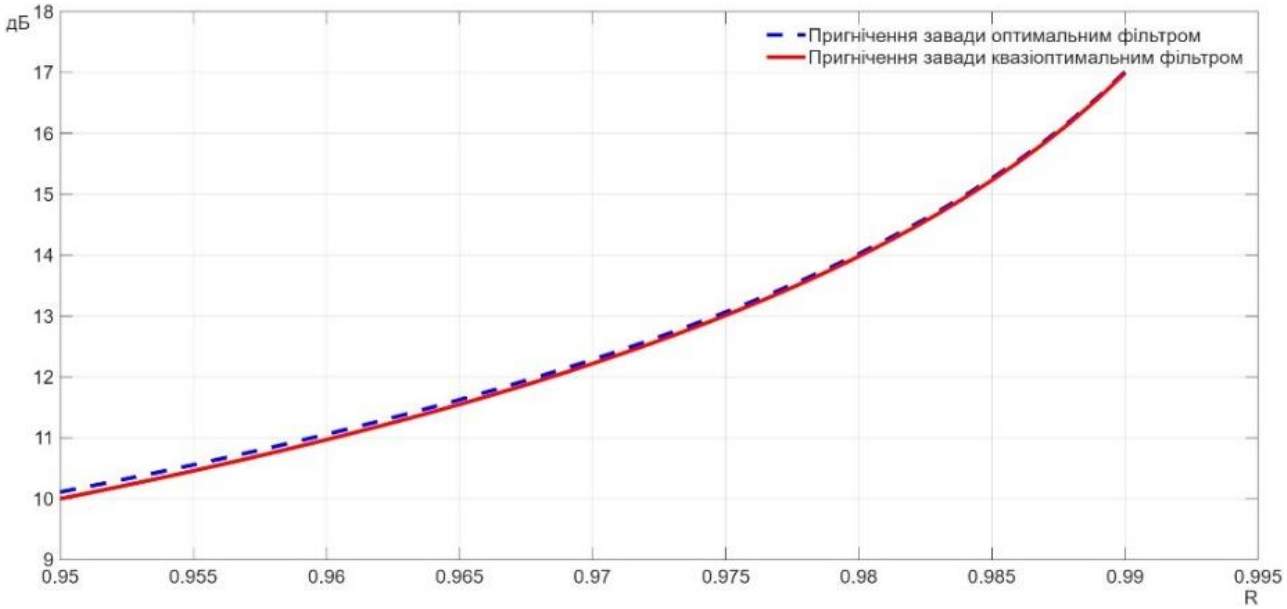


Рис. 1 – Залежність пригнічення завади оптимальним та квазіоптимальним фільтрами в залежності від межперіодного коефіцієнта кореляції.

Результати аналізу. Порівняльний аналіз потужностей перешкод на виходах оптимального та квазіоптимального фільтрів показує, що для типових значень міжперіодного коефіцієнта пасивних завад $R \geq 0.95$ потужність завади на виході квазіоптимального фільтра перевищує потужність завади на виході оптимального фільтра не більше ніж на 0.1 дБ.

Висновки. 1. Синтезовано оптимальний та квазіоптимальний фільтри придушення завад за критерієм мінімуму потужності завади на виході. 2. Доведено, що в типових умовах розглянуті фільтри мають практично однакову ефективність.

Використання інструментів ШІ. При підготовці тез інструменти ШІ не використовувались.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Haykin, S. (2014). Adaptive filter theory (5th ed.). Pearson Education.
[2] Melvin, W. L., & Scheer, J. A. (Eds.). (2013). Principles of modern radar: Advanced techniques (Vol. 2). Institution of Engineering and Technology.
[3] Klemm, R. (2002). Principles of space-time adaptive processing (3rd ed.). Institution of Engineering and Technology.

Averochkin V.O., Goncharov V.S.

Comparative analysis of the frequency response characteristics of optimal and quasi-optimal filters for passive noise suppression

Abstract. *An analysis was conducted of the potential characteristics of optimal and quasi-optimal filters for suppressing passive interference in radar detection. It is shown that the performance characteristics of the filters under consideration are practically identical in terms of both interference suppression and the output signal-to-interference ratio; however, the quasi-optimal filter is simpler to implement in the practical design of adaptive interference suppression systems.*

Keywords: *radar detection; passive interference; optimal and quasi-optimal interference suppression filters.*