

**Key words:** *International System of Units (SI), energy, work, force moment, torque, dimension.*

Рецензент: Шкарівський Г.В., канд. техн. наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

УДК 621.391.83

*Габрук Р. А., Горішна І. Я.*

### **ТРЕНАЖЕРНА СУМІСНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИГНАЛІВ І ФІЛЬТРІВ З УРАХУВАННЯМ ДОДАТКОВИХ ОБМЕЖЕНЬ**

*У цій праці розглянуто методи сумісної оптимізації сигналу та фільтра з урахуванням додаткових обмежень на постійну дозволу за часом, величину втрат у відношенні сигнал/шум та методів оптимізації сигналу й фільтра за фіксованої амплітудної модуляції сигналу, дослідження ефективності яких проаналізовано. Програмно математичну модель знаходження оптимальної пари «сигнал–фільтр» з використанням методу ітерацій реалізовано в середовищі програмування Matlab.*

**Ключові слова:** *радіоелектроніка, сумісна оптимізація, метод ітерацій, постійна дозволу за часом, амплітудна модуляція, відношення сигнал/шум.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Наразі авіація не мислима без радарів. Бортова радіолокаційна станція (БРЛС) є одним з найважливіших елементів радіоелектронного обладнання сучасного літального апарата й авіаційного тренажера. Однією з основних проблем радіолокаційних станцій (РЛС) є позбавлення від сигналу, що відбивається від нерухомих об'єктів. Наприклад, для бортових РЛС проблема в тому, що відображення від земної поверхні затіняє всі об'єкти, що лежать нижче літака.

Під сигналом розуміємо будь-яку змінну, яка передає або містить деякий вигляд інформації і яку можна, наприклад, переносити, виводити на екран або виконувати з нею якісь дії. Більшість сигналів, які є в природі, за своєю формою аналогові, що часто означає безперервну зміну в часі, й що описують зміну фізичних величин (наприклад, звукові хвилі). Сигнали, вживані в ЦОС (цифрове оброблення сигналу), зазвичай виходять з аналогових сигналів, що дискретизують через однакові проміжки часу й перетворені в цифровий вигляд.

Оброблення цифрового сигналу [1] зазвичай потрібно для усунення інтерференції або шуму, здобуття спектру даних або перетворення сигналу в зручнішу форму. Індивідуальні характеристики сигналу є функціями його структури за часом і частотою, спектру, розподілу енергії сигналу на частотно-часовій площині, автокореляційних властивостей.

Навіть у разі гостроспрямованого опромінювання цілі від її поверхні відбивається незначна частина випромінюваної енергії. Ще більшою мірою розсіювання енергії проявляється на шляху від цілі до приймальної антени через слабку спрямованість вторинного випромінювання [2]. Сигнали, що надходять, особливо на великих відстанях, виявляються слабкими, й потрібно вжити низку заходів, щоб виділити їх на фоні

перешкод (власних шумів приймача, шумів космічного походження, перешкод від інших радіопристроїв тощо). До таких заходів належать: збільшення середньої потужності зондувальних коливань, габаритів антен, застосування високочутливих малощумних елементів приймача. Поряд з цим має бути передбачено таке оброблення суміші сигналів і перешкод, за якого забезпечується найкраще використання взаємних відмінностей сигналу й перешкод для вирішення завдань радіолокації. Взаємні відмінності потрібно найкраще використовувати й у разі вирішення сигналів від кількох цілей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню проблеми захисту від перешкод приділено велику увагу як в іноземній, так і у вітчизняній літературі. В класичних працях Ф.М. Вудворда, Д. Міддлтона, В.І. Бунімовича, Л.А. Вайнштейна, В.Д. Зубакова, Г.П. Тартаковського, Я.Д. Ширмана, С.Є. Фальковича та інших розроблено теоретичні основи виявлення сигналів на фоні перешкод. Показано, зокрема, що принципова можливість вирішення цього завдання ґрунтується на використанні відмінностей (часових, частотних та інших) сигналів, що несуть корисну радіолокаційну інформацію, та перешкод. Питання, присвячені просторово-часовому обробленню сигналів, детально розглянуто в працях С.Є. Фальковича, І.Я. Кремера та О.І. Кремера, Я.Д. Ширмана.

У працях [3, 4] в основному розглянуто сигнали типу М-последовності, а також недостатньо повно досліджено ступінь впливу доплерівської зміни частоти. У зв'язку з цим поряд із загальним завданням визначення оптимальних алгоритмів оброблення сигналу в цілому, яке вирішують під час проектування РЛС, виникає завдання вибору оптимальних методів оброблення сигналів знаходженням оптимального фільтра для повного або ж часткового притлумлення бічних пелюсток і підтриманням необхідного значення відношення сигнал/шум.

**Метою цієї статті** є дослідження ефективності використання ітераційного методу для оптимізації пари «сигнал–фільтр», що приведе до покращення виявлення сигналу, який містить корисну радіолокаційну інформацію про об'єкт. А також реалізація математичної моделі знаходження оптимальної пари «сигнал–фільтр» з використанням методу ітерацій в середовищі програмування Matlab.

**Викладення основного матеріалу.** Як відомо, процес оброблення радіолокаційних сигналів і отриманих при цьому даних можна розділити на два етапи: етап вилучення первинної радіолокаційної інформації та етап оброблення даних. Оброблення радіолокаційних сигналів на першому етапі покладається на деякі радіотехнічні пристрої, такі, як антена, приймач, пристрої фільтрації й вимірювання параметрів сигналів. Пристрої фільтрації й вимірювання параметрів сигналів посідають зазвичай значне місце в загальному комплексі радіотехнічної апаратури радіолокаційної системи (РЛС) і визначають більшість її основних характеристик.

Кореляційна функція є одним з найважливіших понять у теорії сигналів. Пояснюють це так. Передавання й приймання сигналів необхідні для отримання корисної інформації. Так, у радіолокації необхідно отримати дані про рух об'єкта, тобто виміряти його дальність, швидкість та деякі інші параметри [5]. Дальність вимірюють за часом запізнювання відбитого від об'єкта сигналу, швидкість – за його частотою Доплера. Вимірювати параметри можна тільки після впевненого виявлення сигналу. Процес виявлення зводиться до оптимального оброблення сигналу погодженим з фільтром або корелятором. Для отримання корисної інформації можна використовувати тільки напругу на виході узгодженого фільтра, оскільки, тільки пройшовши через фільтр, сигнал значною мірою звільняється від перешкод. Тому з точки зору вимірювання корисних параметрів сигналу насамперед являє інтерес сигнальний складник напруг на виході фільтра (відгуку фільтра). А відгук фільтра є взаємною кореляційною функцією сигналу. Звернено увагу на аналізування сигналів, які мають невелику потужність випромінювання, розтягнуті за часом, але з тією самою енергією порівняно з

імпульсними сигналами, які випромінюються з великою потужністю, що істотно впливає на екіпаж судна, який піддається впливу негативного випромінювання.

Виділення радіолокаційної інформації забезпечується вимірюванням різних параметрів сигналу, відбитого від цілі. Для визначення напрямку приходу сигналу (кутових координат цілі) можна використовувати вимір різниці фаз, амплітуд або часу запізнювання між сигналами, прийнятими різними антенними приймачами. Дистанція й швидкість переміщення цілі визначають вимірюванням відповідно часу запізнювання й зсуву частоти між відбитим і сигналами зондування. Протяжність і характер руху цілі оцінюють за результатами аналізування фазо-частотної характеристики віддзеркалених сигналів.

У РЛС можна зазвичай виділити кілька функційно закінчених систем, у кожній з яких прийняті радіолокаційні сигнали обробляють за тим чи іншим параметром. Так, наприклад, в антенних і приймальних системах сигнали вибираються у напрямку приходу й виду поляризації, а в системах фільтрації й вимірювання оброблення сигналу проводять за такими параметрами, як амплітуда, час запізнювання, частота й фаза.

Функція невизначеності сигналу дуже корисна. Роль цієї функції зводиться до того, що за нею можна порівняти різні види й форми сигналів з точки зору точності та роздільної здатності за дальністю і швидкістю. За функцією невизначеності легко встановити, в яких ділянках площини цілі вирішуються краще і в яких гірше, за яких значень дальності й швидкості можна розраховувати на точніше вимірювання параметрів. Отже, хоча точність і роздільна здатність залежать від багатьох чинників, і, зокрема, від методу оброблення сигналів, функцію невизначеності можна розглядати як деяку узагальнену характеристику, що пов'язана тільки з формою сигналу і характеризує ці найважливіші параметри радіолокаційної системи.

Завдання оптимального виявлення точкової цілі на фоні суміші перешкод шумів зводиться в загальному випадку до такого вибору сигналу  $S(t)$  і фільтра  $W(t)$ , які дають максимум відношення сигнал/(перешкода + шум) [6]. Визначення сигналу й фільтра, що дають максимум відношення сигнал/(перешкода + шум), пов'язане з розв'язанням варіаційної задачі, яка призводить до системи інтегральних рівнянь. Для вирішення рівнянь пропонують використовувати ітераційні методи.

Ітераційна процедура оптимізації сигналу й фільтра для знаходження максимального відношення сигнал/(перешкода + шум) за різних їх розмірностей полягає в почерговому розв'язанні інтегральних рівнянь для фільтра й сигналу за фіксованої норми сигналу й фільтра [7]. На першому етапі методу для заданого початкового вектора сигналу розв'язують рівняння, що визначає імпульсний відгук фільтра. На другому етапі для отриманого так фільтра розв'язують рівняння, що визначає сигнал, тощо. Отже, ітераційний метод складається з двох етапів, при цьому кожне значення знайденого фільтра або сигналу проходить процес нормування на кожному ітераційному циклі.

У праці розглянуто методи сумісної оптимізації сигналу й фільтра з урахуванням додаткових обмежень на постійну дозволу за часом, величину втрат у відношенні сигнал/шум і методи оптимізації сигналу й фільтра за фіксованої амплітудної модуляції сигналу, дослідження ефективності яких розглядають у цій праці. Під час розрахунків ми користувалися ітераційною процедурою максимізації відношення сигнал/шум з урахуванням обмежень на втрати у відношенні сигнал/шум і на постійну дозволу за часом, де відношення сигнал/перешкода розглядалося у вигляді [8]:

$$\Sigma = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} W^*(t)S(t)dt \right|^2}{\nu \int_{-\infty}^{\infty} |W(t)|^2 dt + \sigma_0 \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{\xi}(\tau, 0) |\chi_{sw}(\tau, 0)|^2 d\tau}, \quad (1)$$

де  $\chi_{sw}(\tau, f) = \chi_{\rho}(\tau, f) \sum_{n=0}^{N-1} W_n^* S_{n+k} e^{i2\pi n f T_0}$  – функція невизначеності;

$T_0$  – тривалість елементарного імпульсу в сигналі;

$f$  – частота Доплера;

$N$  – кількість імпульсів у сигналі;

$NT_0$  – період сигналу (в періодичному режимі роботи);

$S_{n+k} = [s_{n+k}] e^{i\varphi_{n+k}}$  – комплексна амплітуда сигналу, затриманого на  $k$  позицій;

$\varphi_{n+k}$  – фаза сигналу;

$W_n^*$  – комплексна амплітуда опорного сигналу (фільтра);

$\sigma_0$  – коефіцієнт, що характеризує відображені властивості перешкоди;

$\sigma_{\xi}(\tau, 0)$  – дальнісно-швидкісний розподіл заважальних відображень;

$\nu, \xi$  – параметри, які визначають обмеження на втрати сигнал/шум ( $\nu$ ) і обмеження на постійну дозволу за часом ( $\xi$ ).

Вираз постійної дозволу за часом має такий вигляд [9]:

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\chi_{sw}(\tau, 0)|^2 d\tau}{|\chi_{sw}(0, 0)|^2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} W^*(t)S(t+\tau)dt \right|^2 d\tau}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} W^*(t)S(t)dt \right|^2} = T_R. \quad (2)$$

Постійна дозволу за часом має найкраще значення, коли всі бічні пелюстки взаємної кореляційної функції (ВФН) дорівнюють нулю. Розв'язок задачі шукатимемо за значень параметрів  $\nu = N_0 \xi = 1$ . Фактично, розглядаємо задачу максимізації відношення сигнал/шум (шум зі спектральною щільністю  $N_0$ ) за обмежень на постійну дозволу за часом у разі обмежень на постійну дозволу за часом. На першій ітерації шукаємо фільтр, який забезпечує за вибраних параметрів  $\nu$  і  $N_0 = 10^{-3}$  практично повне притлумлення бічних пелюсток. Це пов'язано з тим, що задача для дискретних сигналів відповідає випадку  $N-1$  подавлення бічних пелюсток, який відповідає умовам нульових зон, тобто зон з повним подавленням бічних пелюсток.

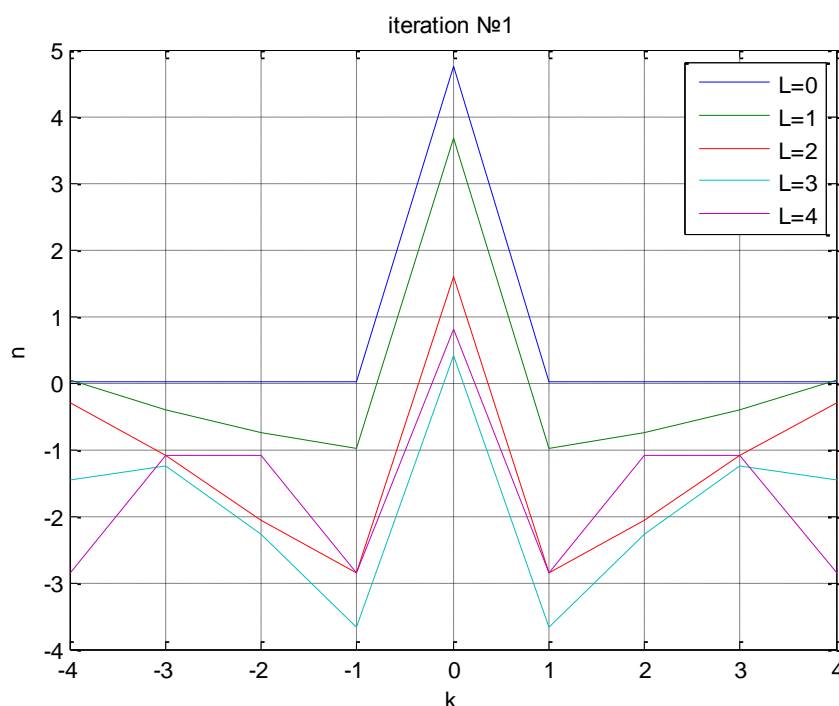
На початку практичних розрахунків можуть мати місце великі втрати у відношенні сигнал/(перешкода + шум). Тому пропонують використовувати описані вище процедури для формування фільтрів, які дають змогу отримати мінімальні втрати у відношенні сигнал/(перешкода + шум). Вираз втрат у відношенні сигнал/шум має вигляд:

$$\rho = \frac{|W^* S|^2}{W^* W \cdot S^* S}. \quad (3)$$

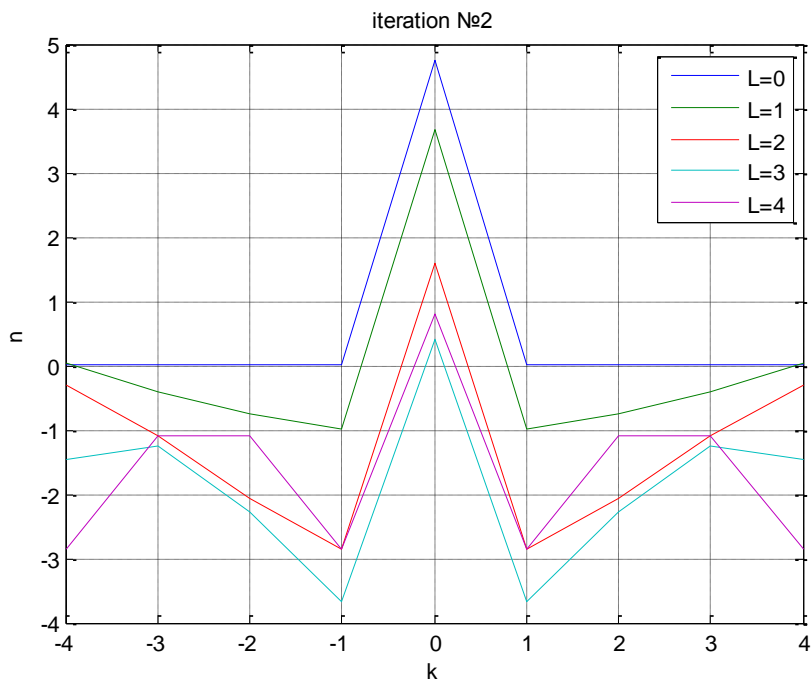
Запропонований метод реалізовано у вигляді комп'ютерної програми, написаної в середовищі програмування Matlab, за допомогою якої ми реалізували ітераційний процес сумісної оптимізації фільтра й сигналу, а також отримали графіки перерізів ВФН за

$$f = \frac{l}{4NT_0} \text{ (рис. 1а-2б).}$$

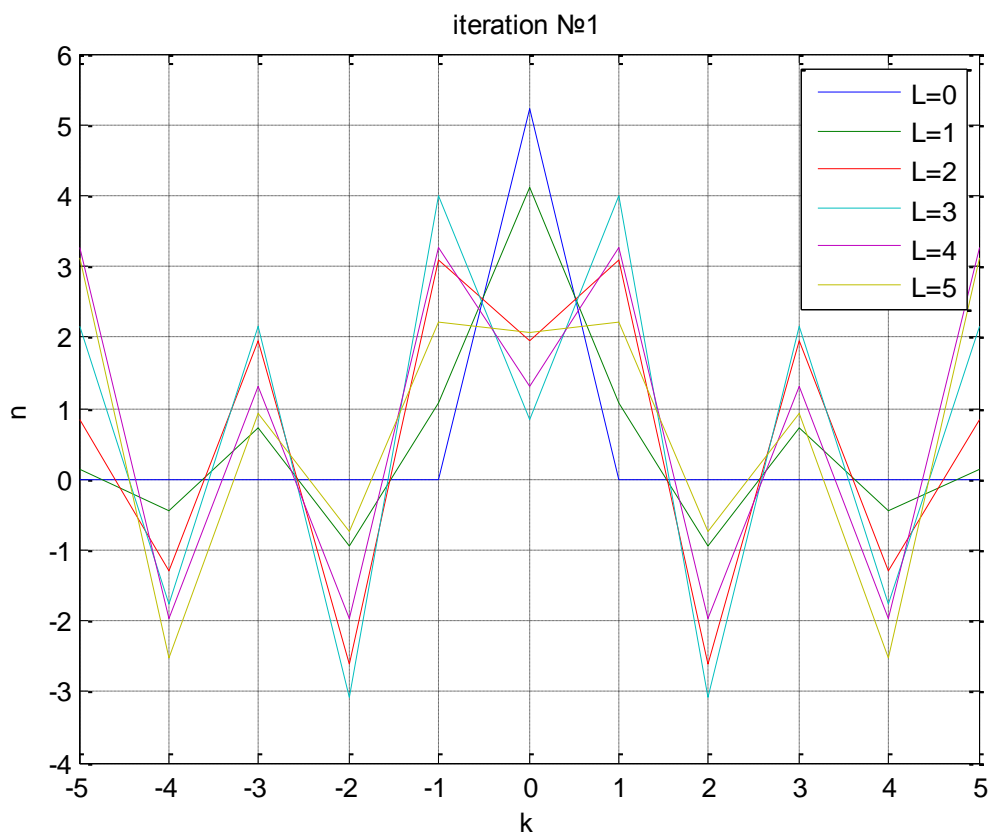
У цьому разі як початкове наближення розглядали сигнал у вигляді дискретної послідовності за  $N = 5$  такого виду  $s = [1; -1; -1; -1; -1]$ . В результаті ітераційного процесу отримали пару сигнал-фільтр, яка забезпечує значення постійної дозволу за часом  $T_R = 1$  (тобто повне притлумлення бічних пелюсток за  $L = 0$ ) і  $\rho = 1$ , що означає відсутність втрат у відношенні сигнал/шум (рисунок 1б) і відповідає випадку узгодженого оброблення. Для розрахунку значень оптимального фільтра маємо такий вираз для нормування фільтра:  $\sum |W|^2 = c_w [10]$ . Кожний елемент матриці помножено на таке значення  $c = \sqrt{\frac{N}{c_w}}$ . де  $N=3$  (кількість елементів сигналу/фільтра). Отже, підтримується норма вихідного сигналу/фільтра. Також проведено оптимізацію для аперіодичного випадку.



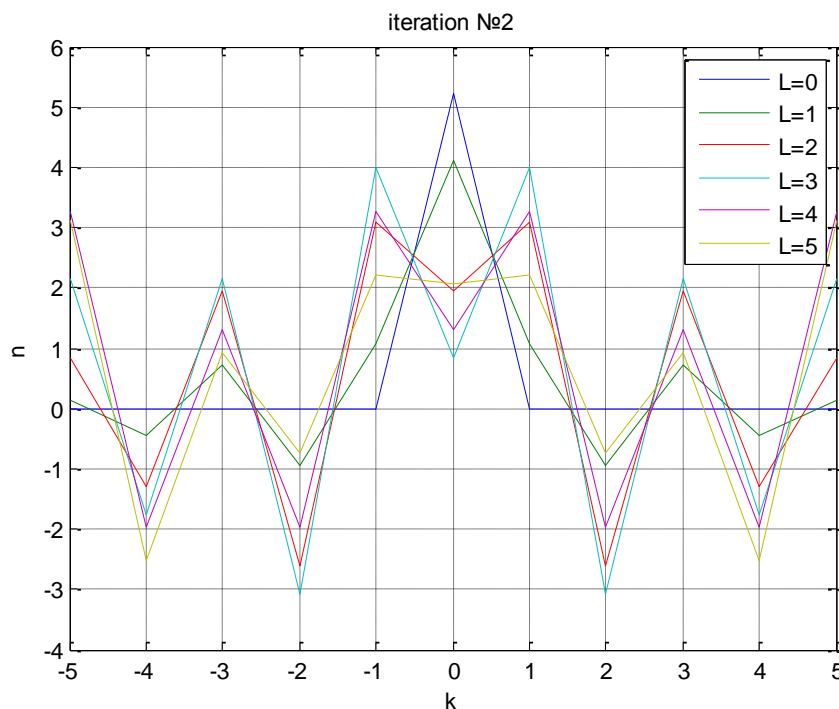
**Рисунок . 1а.** Форма ВФН та її перерізів за  $l=0 \dots 4$  періодичного сигналу  $s=[1; -1; -1; -1; -1]$ .  
Значення оптимального фільтра:  $W_n = [1.5811; -0.7906; -0.7906; -0.7906; -0.7906]$ .  
Втрати в співвідношенні сигнал / шум  $\rho = 0.9001$ .



**Рисунок . 16.** Форма ВФН та її перерізів at  $l=0 \dots 4$  для оптимального фільтра  $W_n=[1.3416; -0.8944; -0.8944; -0.8944; -0.8944]$ . Значення оптимального сигналу:  $S_{norm}=[1.3416; -0.8944; -0.8944; -0.8944; -0.8944]$ . Втрати в співвідношенні сигнал / шум  $\rho = 1.0000$ .



**Рисунок . 2 а.** Форма ВФН та її перерізів at  $l=0 \dots 5$  періодичного сигналу  $s=[1; 1; -1; 1; -1; 1]$ . Значення оптимального фільтра  $W_n=[1.9639; 0.6547; -0.6547; 0.6547; -0.6547; 0.6547]$ . Втрати в співвідношенні сигнал / шум  $\rho = 0.7619$ .



**Рисунок . 2 б.** Форма ВФН та її перерізів at  $l=0\dots 5$  для оптимального фільтра  $W_n=[1.9638; 0.6547; -0.6547; 0.6547; -0.6547; 0.6547]$ . Значення оптимального сигналу:  $S_{norm}=[1.0004; 0.9999; -0.9999; 0.9999; -0.9999; 0.9999]$ . Втрати в співвідношенні сигнал / шум  $\rho = 0.7621$ .

Крім того, розрахунки виконували для сигналів типу  $N = 3, 8, 9$  для періодичного випадку, коли отримані подібні результати, а також для аперіодичного випадку. Використання отриманих сигналів для різних  $N$  ( $N_1, N_2, \dots, N_p$ ) нових сигналів може бути побудовано за допомогою методу, який ґрунтується на елементарному множенні сигналів з взаємно простими періодами.

**Висновки.** У цій праці розглянуто задачу максимізації співвідношення сигнал/ шум з додатковими обмеженнями в ньому та обмеженнями на постійну дозволу за часом. Результати розрахунків підтвердили ефективність розглянутої ітераційної процедури, що дає можливість за відповідного вибору початкового сигналу одержати оптимальні рішення. Результати розрахунків, проведених у середовищі програмування Matlab, підтвердили ефективність запропонованого ітераційного методу, який дає змогу поліпшити співвідношення сигнал/(перешкода + шум) притлумленням бічних пелюсток для знаходження оптимального фільтра для сформованого сигналу.

У праці використано сигнали з малою потужністю, розтягнуті за часом, але з тією самою енергією. Це необхідно для зменшення потужності випромінювання, оскільки вони негативно впливають на організм екіпажу. Для зменшення потужності використано безперервні сигналами замість імпульсних, щоб так убезпечити працівників.

Перспективою подальших наукових досліджень запропонованого методу може бути використання його для діапазонів швидкісного розподілу заважальних відображень, що містять кілька перерізів ВФН з різними доплерівськими зсувами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи і практичне застосування. Пер. з англ. – М.: Видавничий дім «Вільямс», 2003. – 1104 с. – С.33, ISBN 5-8459-0497
2. Слока В. К. Питання обробки радіолокаційних сигналів / В. К. Слока. – М.: Радянське радіо, 1970. – 256 с.

3. Варакин Л. С. Формування та оброблення складних сигналів в радіолокаційних і радіозв'язних системах / Л. С. Варакин. – М.: ВЗЕИС, 1967. – 308 с.
4. Варакин Л. С. Теорія систем сигналів / Л. С. Варакин. – М.: Радянське радіо, 1978. – 304 с.
5. Фалькович С. С. Статистична теорія вимірювальних радіосистем / С. С. Фалькович, Е. П. Хомяков. – М.: Радіо та зв'язок, 1981. – 287 с.
6. Кошевий В.М. Дослідження ефективності синтезу пари «сигнал-фільтр» при додаткових обмеженнях / В.М. Кошевий, І.Я. Горішна // Сучасні інформаційні технології 2016 (МІТ 2016) / Матеріали шостої Міжнародної конференції студентів та молодих науковців, 25-27 квітня 2016 р. / Міністерство освіти і науки України, ВНЗ «Одеський національний політехнічний університет». – Одеса, ВМВ, 2016. – С. 88–89.
7. Габрук Р.А. Розроблення ітераційного методу для оптимізації пари «сигнал-фільтр» / Р.А. Габрук, І.Я. Горішна/ Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – Харків: ХНУРЕ, 2016 – Випуск №6 (62). - С. 39-43.
8. Варакин Л. С. Системи зв'язку із шумоподібними сигналами / Л. С. Варакин. – М.: Радіо та зв'язок, 1985. – 384 с.
9. Кук Ч. Радіолокаційні сигнали. Введення в теорію та застосування / Ч. Кук, М. Бернфельд. - М.: Радянське радіо, 1971. – 568 с.
10. Кошевий В.М. Використання ітераційного методу для оптимізації сигналу та фільтра / В.М. Кошевий, І.Я. Горішна // Щорічна науково-методична конференція молодих вчених / «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки», 29-30 листопада 2016 р. / Одеське відділення Інституту морської техніки, науки і технології Великобританії (IMarEST). – Одеса: НУ «ОМА», 2016. – С. 105-106.

**Gabruk R. A., Gorishna I. Y.,  
SIMULATOR JOINT OPTIMIZATION OF SIGNALS AND FILTERS WITH  
ADDITIONAL RESTRICTIONS**

*In this paper were considered methods of joint optimization of signal and filter taking into account additional restrictions on constant time resolution, signal / noise losses and optimization methods for signal and filter for fixed signal amplitude modulation, the effectiveness of which has been analyzed. In a software way, the mathematical model for finding the optimal "signal-filter" pair using the iteration method was implemented in the Matlab programming software.*

**Keywords:** radio electronics, joint optimization, iterative method, constant time resolution, amplitude modulation, signal / noise ratio.

Рецензент: Пашков Д. П., д.т.н., проф. завідувач кафедри екологічного моніторингу, геоінформаційних та аерокосмічних технологій, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ