

УДК 681.78

Л.Ф. Купченко<sup>1</sup>, А.С. Риб'як<sup>1</sup>, О.О. Гурін<sup>1</sup>, Р.С. Кочмарчик<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба<sup>2</sup> Військова частина А2042

## АДАПТИВНА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА З ДИНАМІЧНОЮ СПЕКТРАЛЬНОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ ЗА НАЯВНОСТІ МІНЛИВОСТІ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Розроблений метод, що забезпечує виявлення об'єктів за допомогою оптико-електронних систем з динамічною спектральною фільтрацією при відмінності спектральних характеристик поточних і опорних сигналів фону. Метод передбачає використання адаптивних алгоритмів і полягає в тому, що при певному значенні розузгодженості між сигналами система переходить в режим реєстрації спектральних характеристик фону. В якості міри узгодженості оптимальної обробки при наявності спектральної мінливості вхідних і опорних сигналів використовується нормована дивергенція Кульбака-Лейблера. Розроблено структурну схему оптико-електронної системи з динамічним управлінням спектральними характеристиками оптичного випромінювання на основі акустооптичних фільтрів.

**Ключові слова:** дивергенція Кульбака-Лейблера, динамічна спектральна фільтрація, оптимальна обробка оптичних сигналів.

### Вступ

Динамічна спектральна фільтрація оптичного випромінювання лежить в основі узгодженої оптимальної обробки сигналів в переддетекторній області. На відміну від відеоспектрометрів в оптико-електронних системах (ОЕС) з динамічною спектральною фільтрацією диспергувальний пристрій виконує дві функції. По-перше, забезпечує розкладання прийнятого випромінювання на спектральні компоненти, а по-друге, дозволяє змінювати коефіцієнти пропускання кожної спектральної компоненти, так, щоб забезпечити максимальне заглушення спектральних складових випромінювання фону при мінімальному послабленні оптичного сигналу об'єкта [1, 2].

Оскільки апаратна функція пристрою спектральної фільтрації, що забезпечує узгоджену фільтрацію оптичного випромінювання, формується з використанням апріорних спектральних характеристик об'єкта і фону, то, по суті, в оптико-електронній системі з динамічною спектральною фільтрацією здійснюється оцінювання степеня кореляції (узгодженості) між опорними сигналами, що належать об'єкта і фону та беруть участь у формуванні сигналу управління, і спектральними характеристиками вхідного сигналу.

Спектральні характеристики об'єкта і фону, які містяться в бібліотеці оптико-електронної системи, повинні відповідати реальним спектральним характеристикам досліджуваної поверхні Землі. Якщо із-за спектральної мінливості такої відповідності немає, то еталонні характеристики не можуть, в загальному випадку, бути використані для формування сигналів управління селектувальним пристроєм [3].

У роботі [4] розроблений критерій оцінювання узгодженості оптимальної обробки сигналів заснований на їх інформаційних характеристиках. Математичною основою розробленого критерію запропоновано використовувати дивергенцію Кульбака-Лейблера, яка є взаємною інформативною мірою віддаленості один від одного двох імовірнісних розподілів сигналів об'єкта і фону. Критерієм узгодженості оптимальної обробки сигналів, виступає ознака, що полягає в рівності одиниці дивергенції Кульбака-Лейблера на виході узгодженого фільтра нормованої його вхідною дивергенцією. Інформаційний критерій дозволяє визначити, в якій мірі відхилення параметрів сигналів і їх кореляційних характеристик від апріорних значень впливають на властивості узгодженої фільтрації оптичного випромінювання.

Істотно, що якщо спектральні характеристики випромінювання об'єкта і завади (фону) описуються нормальним законом розподілу, то імовірність похибки виявлення і дивергенція Кульбака-Лейблера є взаємозв'язаними, оскільки дивергенція заснована на оцінці густини розподілу імовірності.

### Постановка задачі

У даній роботі для поліпшення характеристик оптико-електронних систем з динамічною спектральною фільтрацією у разі спектральної мінливості запропоновано використовувати адаптивні алгоритми. Принципова відмінність адаптивної оптико-електронної системи полягає в тому, що окрім апріорних відомостей використовуються результати спостережень. Адаптивні алгоритми забезпечують кращі характеристики оцінювання параметру, ніж неадаптивні, оскільки при їх використанні реалізу-

ється уся доступна інформація як апіорна, так і та, що міститься в спостереженні. Це дозволяє зменшити невизначеність початкових даних [5].

Зазвичай при розв'язанні задачі виявлення об'єктів за допомогою ОЕС кількість реалізацій, що приймаються за умови наявності сигналу фону, на декілька порядків більша кількості вибірок, прийнятих за умови наявності сигналу об'єкта. Отже, відхилення статистичних характеристик фону від апіорних значень матиме суттєво більший вплив на вихідні характеристики оптико-електронних систем. Саме тому при використанні адаптивних алгоритмів уточнюватимуться тільки статистичні характеристики фону.

В якості пристрою, що забезпечує переддетекторну обробку вхідних оптичних сигналів, пропонується використовувати акустооптичний фільтр, в якому немонохроматичне оптичне випромінювання дифрагує на багаточастотній акустичній хвилі. Сигналом управління є багаточастотний акустичний сигнал, амплітудно-частотна характеристика якого визначає спектральний коефіцієнт пропускання акустооптичного фільтра.

Апаратна функція (форма смуги пропускання) акустооптичних фільтрів характеризується високими динамічними властивостями і здатна змінюватися в широкому діапазоні, що дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми.

**Метою статті є** розробка методу, що дозволяє здійснювати виявлення об'єктів за допомогою оптико-електронних систем з динамічної спектральної фільтрації при розходженні спектральних характеристик поточних і опорних сигналів фону.

### Основний розділ

Оптико-електронна система, до складу якої входить селектувальний пристрій, розділяє робочий діапазон довжин хвиль  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  на спектральні канали із спектральними характеристиками пропускання  $\tau_1(\lambda), \dots, \tau_k(\lambda), \dots, \tau_n(\lambda)$ .

Спектральна характеристика пропускання оптико-електронної системи визначається апаратною функцією селектувального пристрою, яка є сумою характеристик пропускання спектральних каналів і має вигляд:

$$F(\lambda) = \sum_{k=1}^n \tau_k(\lambda) \quad (1)$$

Тоді сигнал  $Y(i, j)$ , що реєструється на виході оптико-електронної системи в елементі з координатами  $(i, j)$ , матиме вигляд

$$Y(i, j) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} X(i, j, \lambda) F(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

З виразу (2) виходить, що сигнал на виході оптико-електронної системи є скалярним добутком вектора  $\vec{X}_{i,j} = [x_1(i, j), \dots, x_k(i, j), \dots, x_n(i, j)]^T$ , відповідного вхідному потоку випромінювання від елемента з координатами  $(i, j)$ , і вектора фільтра  $\vec{F} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ , відповідного апаратній функції пристрою спектральної фільтрації ОЕС  $F(\lambda)$ . Використовуючи векторне представлення сигналів, вираз (2) можна представити в такому вигляді:

$$Y = \vec{F}^T \vec{X}$$

Для пояснення роботи селектувального пристрою розглянемо двовимірний простір, де кожна з осей відображує величину інтенсивності світла в певному спектральному діапазоні (рис. 1). Припустимо, що  $n$ -мірні реалізації, що приймаються за умов наявності сигналів об'єкта і фону, підлягають нормальному закону з відповідною густиною:

$$P_{\text{обв}}(\vec{X}) = N(\vec{\mu}_{\text{обв}}, \Gamma_{\text{обв}});$$

$$P_{\text{фвх}}(\vec{X}) = N(\vec{\mu}_{\text{фвх}}, \Gamma_{\text{фвх}}),$$

де  $\vec{\mu}_{\text{обв}}$  та  $\vec{\mu}_{\text{фвх}}$  – математичні очікування сигналів об'єкта і фону;  $\Gamma_{\text{обв}}$  і  $\Gamma_{\text{фвх}}$  – кореляційні матриці сигналів об'єкта і фону.

Вектор фільтра  $\vec{F}_n$ , що забезпечує оптимальну обробку оптичного випромінювання, визначається таким чином [2]:

$$\vec{F}_n = r \Gamma_{\text{оп}}^{-1} \vec{\xi}_{\text{оп}},$$

де  $\vec{\xi}_{\text{оп}} = \vec{\mu}_{\text{ооп}} - \vec{\mu}_{\text{фооп}}$  – різницевий вектор математичних очікувань опорних сигналів об'єкта і фону;  $r$  – нормуючий множник;  $\Gamma_{\text{оп}} = \Gamma_{\text{ооп}} = \Gamma_{\text{фооп}}$  – кореляційна матриця опорних сигналів,  $\vec{\Phi}_1$  і  $\vec{\Phi}_2$  – власні вектори кореляційної матриці.

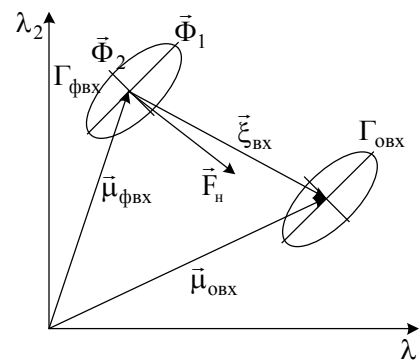


Рис. 1. До пояснення принципів динамічної спектральної фільтрації оптичного випромінювання

Якщо вхідні спектральні характеристики фону і об'єкта відрізняються від апіорних (опорних) зна-

чень, то для оцінки відмінності скористаємося інформаційним критерієм. Це дозволить визначити, в якій мірі відхилення параметрів сигналів і їх кореляційних характеристик від апріорних значень впливають на властивості узгодженої фільтрації оптичного випромінювання.

Визначимо взаємну інформаційну міру – дивергенцію Кульбака-Лейблера для сигналів на вході узгодженого фільтра  $D_{вх}$  і на його виході  $D_{вих}$  [4]:

$$D_{вх} = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} & \bar{\xi}_{вх}^T (\Gamma_{овх}^{-1} + \Gamma_{фвх}^{-1}) \bar{\xi}_{вх} + \\ & + \text{tr} (\Gamma_{овх}^{-1} \Gamma_{фвх} + \Gamma_{фвх}^{-1} \Gamma_{овх} - 2I) \end{aligned} \right]; \quad (3)$$

$$D_{вих} = \frac{1}{2\sigma_o^2\sigma_\phi^2} \left[ (\sigma_o^2 + \sigma_\phi^2)\zeta^2 + (\sigma_o^2 - \sigma_\phi^2)^2 \right], \quad (4)$$

де  $\bar{\xi}_{вх} = \bar{\mu}_{овх} - \bar{\mu}_{фвх}$  – різницевий вектор математичних очікувань об'єкта і фону на вході фільтра;  $I$  – одинична матриця;  $\text{tr}(\cdot)$  – слід матриці,  $\zeta = \bar{F}^T \bar{\xi}_{вх}$  – різниця математичних сподівань сигналів об'єкта і фону на виході фільтра;  $\sigma_o^2 = \bar{F}_н^T \Gamma_{овх} \bar{F}_н$  і  $\sigma_\phi^2 = \bar{F}_н^T \Gamma_{фвх} \bar{F}_н$  – дисперсії сигналів об'єкта і фону на виході відповідно.

Відношення дивергенції Кульбака-Лейблера на виході узгодженого фільтра до дивергенції на

його вході  $R = D_{вих}/D_{вх}$  дорівнює одиниці, якщо рівні між собою кореляційні матриці вхідних сигналів об'єкта і фону  $\Gamma_{овх} = \Gamma_{фвх} = \Gamma_{вх}$ , а також вхідний і опорний вектори різниць математичних сподівань сигналів об'єкта і фону  $\bar{\xi}_{вх} = \bar{\xi}_{оп}$ . Отже, якщо апріорні статистичні характеристики опорних сигналів об'єкта і фону повністю відповідають характеристикам сигналів на вході фільтра, то нормована дивергенція Кульбака-Лейблера дорівнює одиниці.

Таким чином, розроблений метод підвищення якості виявлення об'єктів за допомогою ОЕС, полягатиме в тому, що при зменшенні значення нормованої дивергенції, пов'язаної з відмінністю поточних і опорних спектральних характеристик оптичних сигналів, нижче порогової величини оптико-електронна система переходить в режим спостереження – вимірювання поточних спектральних характеристик фону.

Для цього до складу ОЕС включається спектрометр, що забезпечує вимірювання поточних спектральних характеристик фону, порівняння їх з еталонними і введення корекції в спектральні характеристики фону.

Зображена на рис. 2 схема, що реалізує адаптивний алгоритм, включає такі структурні елементи:

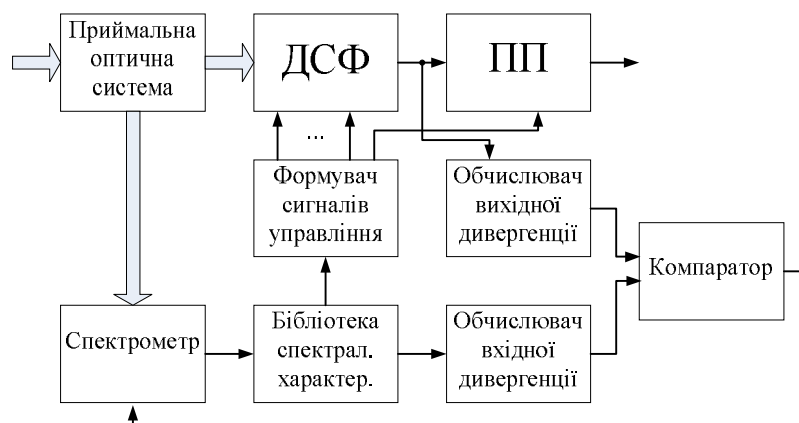


Рис. 2. Структурна схема оптико-електронної системи з динамічною спектральною фільтрацією, що реалізує адаптивний алгоритм

- приймальну оптичну систему, що забезпечує прийом оптичного випромінювання, відбитого від спостережуваної місцевості;

- динамічний спектральний фільтр (ДСФ), що забезпечує розкладання прийнятого оптичного випромінювання на спектральні складові із змінним коефіцієнтом пропускання;

- пороговий пристрій (ПП), що здійснює порівняння сигналу з виходу ДСФ з порогом і формування сигналу про виявлення об'єкта спостереження або його відсутність;

- формувач сигналів управління, що забезпечує обчислення апаратної функції динамічного спек-

трального фільтру і величини порогу, а також формування відповідних сигналів управління;

- бібліотека спектральних характеристик, що забезпечує зберігання інформації про статистичні спектральні властивості об'єкта і навколишнього фону;

- спектрометр, що забезпечує оцінювання статистичних спектральних властивостей об'єкта і навколишнього фону у разі наявності розузгодження між вхідними і опорними сигналами;

- обчислювачі вхідної і вихідної дивергенції Кульбака-Лейблера;

- компаратор, що забезпечує порівняння вхідної

і вихідної дивергенції і формування сигналу включення спектрометра за наявності розузгодження.

Особливість і принципи роботи структурної схеми полягають в наступному. Нехай в прийнятому оптичному сигналі статистичні властивості фону співпадають з апіорними бібліотечними характеристиками.

Отже, вхідна дивергенція цього сигналу може бути обчислена на основі опорних характеристик. У цьому випадку вихідна і вхідна дивергенції співпадають і сигнал на виході компаратора відсутній. За наявності спектральної мінливості сигналів з'являється різниця між дивергенціями і на виході компаратора формується сигнал, що включає спектрометр для уточнення спектральних характеристик фону.

### Висновки

Розроблений метод, що забезпечує виявлення об'єктів за допомогою оптико-електронних систем з динамічною спектральною фільтрацією при відмінності спектральних характеристик поточних і опорних сигналів фону. Розв'язання цієї задачі забезпечується шляхом використання адаптивних алгоритмів і включення до складу оптико-електронної системи спектрометра, що вимірює поточні значення спектральних характеристик фону.

В якості міри узгодженості оптимальної обробки за наявності спектральної мінливості вхідних і опорних сигналів фону використовується нормована дивергенція Кульбака-Лейблера.

### АДАПТИВНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА С ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Л.Ф. Купченко, О.А. Гурин, А.С. Рыбьяк, Р.С. Кочмарчик

*Разработан метод обеспечивающий обнаружение целей оптико-электронными системами с динамической спектральной фильтрацией при различных спектральных характеристиках текущих и опорных сигналов фона. Метод предполагает использование адаптивных алгоритмов и заключается в том, что при определенном значении расхождения между сигналами система переходит в режим регистрации спектральных характеристик фона. В качестве меры согласованности оптимальной обработки при наличии спектральной изменчивости входных и опорных сигналов используется нормированная дивергенция Кульбака-Лейблера. Разработана структурная схема оптико-электронной системы с динамическим управлением спектральными характеристиками оптического излучения на основе акустооптических фильтров.*

**Ключевые слова:** дивергенция Кульбака-Лейблера, динамическая спектральная фильтрация, оптимальная обработка оптических сигналов.

### ADAPTIVE ELECTRO-OPTICAL SYSTEM WITH DYNAMIC SPECTRAL FILTERING IN THE PRESENCE OF OPTICAL SIGNALS VARIABILITY

L.F. Kupchenko, O.A. Goorin, A.S. Rybiak, R.S. Kochmarchyk

*The article describes the method for providing target detection by electro-optical systems with dynamic spectral filtering with difference of spectral characteristics of the current and the reference background signals. The method involves the use of adaptive algorithms and is based on the fact that at a certain value of mismatch between signals the system begins to register the mode of the background spectral characteristics. The normalized Kullback-Leibler divergence is used as the capacity of matching measure of optimum processing in the presence of the spectral variability of input and reference signals. There has been developed a block diagram of an electro-optical system with dynamic control of the spectral characteristics of optical radiation based on acoustic optical filters.*

**Keywords:** Kullback-Leibler divergence, dynamic spectral filtering, optimal processing of optical signals.

Розроблена структурна схема адаптивної оптико-електронної системи з динамічним управлінням спектральними характеристиками оптичного випромінювання.

### Список літератури

1. Купченко Л.Ф. Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах / Л.Ф. Купченко, А.С. Рыбьяк // *Электромагнитные волны и электронные системы* // *Международный научно-технический журнал*. – М.: Радиотехника, 2011. – Т. 16, вып. 4. – С. 32-43.
2. Обнаружение объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации / Л.Ф. Купченко, А.С. Рыбьяк, В.В. Проклов, С.Н. Антонов // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2011. – Т. 10, № 1. – С. 22-26.
3. Manolakis D. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications / D. Manolakis, D. Marden, G.A. Shaw // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 79-113.
4. Купченко Л.Ф. Критерий согласованности оптимальной обработки сигналов в оптоэлектронных системах с динамической спектральной фильтрацией / Л.Ф. Купченко, А.С. Рыбьяк // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2015. – № 1 (41). – С. 120-123.
5. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

Надійшла до редколегії 29.03.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.