

Л.Ф. Купченко, А.С. Риб'як, О.О. Гурін

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НОРМОВАНОЇ ДИВЕРГЕНЦІЇ КУЛЬБАКА-ЛЕЙБЛЕРА

Побудована математична модель процесу оптимальної динамічної спектральної фільтрації в оптико-електронних системах, яка дозволяє дослідити властивості оптимальної обробки оптичних сигналів та перевірити працездатність інформаційного критерію для оцінювання її узгодженості. Приведені результати математичного моделювання оптимальної додетекторної обробки та визначено ступень її узгодженості для трьох випадків: відсутнє розузгодження між вхідними та опорними сигналами; змінилось середнє значення яскравості вхідних оптичних сигналів об'єкта та фону; відбулись зміни в спектральному складі вхідного оптичного сигналу фону.

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

Вступ

У відеоспектрометрах, що використовують принципи зображувальної спектроскопії [1] і призначені для виявлення та розпізнавання об'єктів за спектральними ознаками, в основному, застосовується післядетекторний метод обробки зображень. У таких системах [2–3] прийняте оптичне випромінювання після розкладання на спектральні складові перетворюється приймачем випромінювання в електричні сигнали, які обробляються відповідно до алгоритму оптимального виявлення.

Метод динамічної спектральної фільтрації, основні положення якого викладені в роботах [4–5], передбачає додетекторну оптимальну обробку оптичного випромінювання і полягає в тому, що на основі апріорної інформації про спектральні характеристики випромінювання об'єкта і перешкоди (фону) забезпечується селекція корисного оптичного сигналу, який реєструється приймачем. При цьому сигнал перешкоди (фону) максимально подавляється. Це досягається за рахунок використання керування фільтрів (наприклад, акустооптичних [6]), що забезпечують такий спектральний коефіцієнт пропускання, який є «максимальним» для спектрального потоку випромінювання об'єкта і «мінімальний» для оптичного сигналу перешкоди.

Розв'язання задач оптимальної фільтрації [5] базується на припущенні, що статистичні характеристики прийнятого сигналу відомі апріорно точно і відповідають характеристикам сигналів об'єкта і фону, що містяться в базі даних. Властивості оптимальної спектральної фільтрації визначаються: по-перше, адекватністю інформації, що міститься в базі даних, про поточні спектральні характеристики випромінювання об'єкта і перешкоди (фону); по-друге,

статистичними властивостями оптичних сигналів (математичним очікуванням сигналів об'єкта та фону, їх кореляційними матрицями). Однак на практиці завжди існують відхилення поточних значень сигналів від опорних [7]. Тому функціонування оптимальних пристроїв і систем, що реалізують алгоритми для ідеальної моделі, залежить від величини таких відхилень [8].

Зазвичай для оцінювання якості обробки сигналів оптимальними пристроями використовується ймовірність помилки [9–10]. Однак її обчислення в більшості випадків є трудомістким процесом і вимагає знання апріорних ймовірностей появи або відсутності сигналу об'єкта, інформація про які при розв'язанні задачі виявлення зазвичай відсутня.

В роботі [11] для оцінювання узгодженості оптимальної обробки сигналів в оптико-електронних системах з динамічною спектральною фільтрацією введений новий критерій, який використовує інформаційні характеристики статистичних розподілів сигналів і дозволяє визначати вплив відмінностей між опорними та вхідними сигналами на якість оптимальної обробки оптичних сигналів.

Метою статті є дослідження працездатності інформаційного критерію оцінювання узгодженості оптимальної обробки оптичних сигналів шляхом математичного моделювання динамічної спектральної фільтрації випромінювання в оптико-електронних системах.

Виклад основного матеріалу

Постановка задачі. Нехай оптичні сигнали об'єкта і фону є нормальними випадковими функціями з густиною ймовірності:

$$p_0(\vec{X}) = N(\vec{\mu}_0, \Gamma_0);$$

$$p_{\Phi}(\bar{X}) = N(\bar{\mu}_{\Phi}, \Gamma_{\Phi}),$$

де $\bar{\mu}_o, \bar{\mu}_{\Phi}$ – вектори математичних очікувань сигналів об'єкта і фону; Γ_o, Γ_{Φ} – кореляційні матриці сигналів об'єкта і фону. Тоді взаємні інформаційні міри – дивергенції Кульбака-Лейблера для сигналів на вході динамічного фільтра $D_{вх}$ і на його виході $D_{вих}$ запишуться в наступному вигляді [11]:

$$D_{вх} = \frac{1}{2} \left[\bar{\xi}_{вх}^T (\Gamma_o^{-1} + \Gamma_{\Phi}^{-1}) \bar{\xi}_{вх} + \text{tr}(\Gamma_o^{-1} \Gamma_{\Phi} + \Gamma_{\Phi}^{-1} \Gamma_o - 2I) \right], \quad (1)$$

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

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, Γ_o і Γ_{Φ} – кореляційні матриці вхідних сигналів об'єкта і фону; $\zeta = \bar{F}^T \bar{\xi}_{вх}$ – різниця математичних очікувань сигналів об'єкта і фону на виході фільтра, що визначається за допомогою наступного виразу [5]:

$$\bar{F} = \Gamma_{оп}^{-1} \bar{\xi}_{оп},$$

де $\bar{\xi}_{оп} = \bar{\mu}_{фоп} - \bar{\mu}_{ооп}$ – опорний різницевий вектор математичних очікувань об'єкта і фону; $\Gamma_{оп}^{-1}$ – обернена кореляційна матриця опорного сигналу фону.

Для оцінювання узгодженості оптимальної обробки оптичного випромінювання в оптико-електронних системах будемо використовувати нормовану дивергенцію Кульбака-Лейблера, яка представляє собою відношення дивергенції на виході $D_{вих}$ і вході $D_{вх}$ пристрою обробки [11].

Якщо значення дивергенції рівні $D_{вх} = D_{вих}$, то на виході і вході пристрою обробки зберігається рівність інформаційних мір, що визначають відмінність імовірнісних розподілів прийнятих реалізацій сигналів об'єкта та фону, відповідно, і, таким чином, має місце узгодженість між вхідними і опорним сигналами. Отже, критерієм узгодженості оптимальної обробки сигналів в оптико-електронних системах з динамічною спектральною фільтрацією вважатимемо рівність одиниці нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера $R = 1$. Інформаційний критерій виступає тут в ролі показника якості додетекторної оптимальної обробки оптичних сигналів.

В основі математичної моделі процесу динамічної спектральної фільтрації лежать такі відомі положення:

- RGB-модель кольорових зображень [12];
- незалежність обробки елементів цифрового зображення [12];
- представлення додетекторної обробки оптичного випромінювання елементів зображення у ви-

гляді скалярного добутку вхідного сигналу і апаратної функції оптико-електронної системи з динамічною спектральною фільтрацією [4].

Відповідно до використовуваної RGB-моделі кожен елемент вихідного кольорового зображення з координатами (i, j) представляється у вигляді вектору $\bar{X}_{i,j} = [x_R(i, j), x_G(i, j), x_B(i, j)]^T$ в тривимірному евклідовому просторі, де x_R, x_G, x_B – значення яскравості, виміряні в червоному (R), зеленому (G) і синьому (B) спектральних каналах відповідно.

Математичне моделювання процесу оптимальної динамічної спектральної фільтрації та визначення ступеня її узгодженості включає такі операції.

1. Формування зображень, що імітують вхідні та опорні оптичні сигнали. У якості опорного використовувалося вихідне зображення, а властивості вхідного зображення змінювались відповідно до умов задачі, що розв'язувалась.

2. Обчислення статистичних характеристик опорного і вхідного сигналів – векторів математичного очікування об'єкта $\bar{\mu}_{об}$ і фону $\bar{\mu}_{\Phi}$, а також кореляційної матриці фону Γ_{Φ} з використанням наступних співвідношень [9]:

$$\bar{\mu}_{об} = E[\bar{X}] = \frac{1}{r_{об}} \sum_{n=1}^{r_{об}} \bar{X}_n, \quad \bar{\mu}_{\Phi} = E[\bar{X}] = \frac{1}{r_{\Phi}} \sum_{n=1}^{r_{\Phi}} \bar{X}_n; \quad (3)$$

$$\Gamma_{\Phi} = E \left[(\bar{X} - \bar{\mu}_{\Phi})(\bar{X} - \bar{\mu}_{\Phi})^T \right] = \frac{1}{r_{\Phi} - 1} \sum_{n=1}^{r_{\Phi}} (\bar{X}_n - \bar{\mu}_{\Phi})(\bar{X}_n - \bar{\mu}_{\Phi})^T, \quad (4)$$

де \bar{X}_n – тривимірний вектор n -го елемента репрезентативної вибірки; r – об'єм відповідної репрезентативної вибірки. При обчисленні статистичних характеристик опорне і вхідне зображення ділилися на зображення об'єкта і фону.

3. Обчислення вектору фільтра з використанням отриманих опорних статистичних характеристик сигналів об'єкта і фону

$$\bar{F} = \Gamma_{фоп}^{-1} \bar{\xi}_{фоп}.$$

4. Моделювання процесу спектральної селекції оптичного випромінювання, яке полягає в обчисленні значень яскравості на виході динамічного фільтра для кожного елемента вхідного зображення $Y_{i,j}$:

$$Y_{i,j} = \bar{F}^T \bar{X}_{i,j}.$$

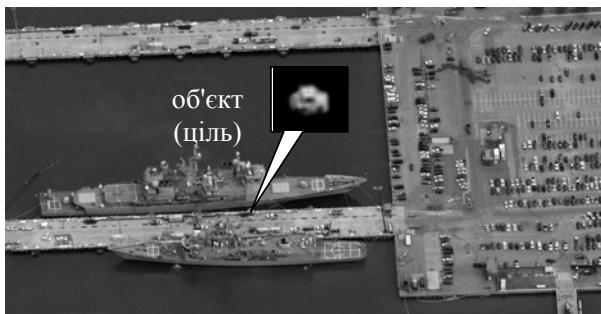
5. Визначення статистичних характеристик вихідних сигналів об'єкта і фону – різниці математичних очікувань об'єкта і фону, $\zeta_{вих} = m_{ових} - m_{фвих}$, а також дисперсії фону $\sigma_{\Phi}^2 = \bar{F}^T \Gamma_{\Phi} \bar{F}$.

6. Визначення ступеня узгодженості оптимальної обробки оптичного випромінювання шляхом обчислення нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера R . У випадку, коли кореляційні матриці вхідних сигналів об'єкта і фону рівні $\Gamma_{\text{вх}} = \Gamma_{\text{овх}} = \Gamma_{\text{фвх}}$, аналітичний вираз для нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера має вигляд:

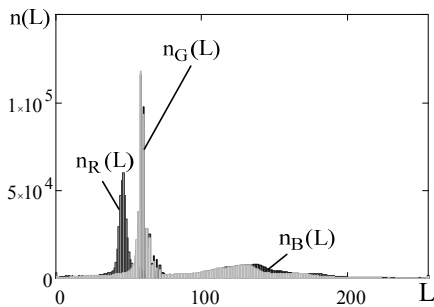
$$R = \frac{D_{\text{вих}}}{D_{\text{вх}}} = \frac{\zeta^2}{\sigma^2 \cdot \bar{\xi}_{\text{вх}} \Gamma_{\text{вх}}^{-1} \bar{\xi}_{\text{вх}}} \quad (5)$$

Розгляд результатів моделювання процесу оптимальної спектральної фільтрації почнемо з формулювання трьох задач, які розв'язуються. По-перше, розв'язується задача, коли статистичні властивості вхідних і опорних сигналів збігаються, по-друге, задача, в якій передбачається, що змінилося середнє значення яскравості оптичного випромінювання об'єкта і фону на вході оптико-електронної системи, і, по-третє, задача, в якій статистичні характеристики вхідного сигналу фону відрізняються від опорних значень.

При математичному моделюванні використовувалося кольорове зображення, наведене на рис. 1, а, на якому зображений фрагмент морського порту. В якості об'єкта, що підлягає виявленню, обраний жовтий автомобіль на одному з причалів. Збільшене зображення об'єкту показано в окремому вікні на рис. 1, а. Гістограма значень яскравості вихідного кольорового зображення в трьох спектральних каналах $n_R(L)$, $n_G(L)$, $n_B(L)$ представлена на рис. 1, б.



а



б

Рис. 1. Початкове зображення (а) та його гістограма (б)

Задача перша. Нехай статистичні характеристики вхідних і опорних сигналів об'єкта і фону збігаються і, отже, забезпечується узгоджена фільтрація. При математичному моделюванні процесу динамічної спектральної фільтрації в даному випадку використовуються однакові зображення, що імітують вхідні та опорні сигнали. В цьому випадку рівні різницеві вектори математичних очікувань опорних і вхідних сигналів об'єкта і фону $\bar{\xi}_{\text{оп}} = \bar{\xi}_{\text{вх}} = \bar{\xi}$, а так же рівні кореляційні матриці $\Gamma_{\text{оп}} = \Gamma_{\text{вх}}$ (де $\Gamma_{\text{вх}} = \Gamma_{\text{овх}} = \Gamma_{\text{фвх}}$; $\Gamma_{\text{оп}} = \Gamma_{\text{ооп}} = \Gamma_{\text{фоп}}$).

Отримане в результаті математичного моделювання спектральної селекції вихідне зображення представлено на рис. 2. На даному зображенні об'єкт (ціль) має найбільшу яскравість, що свідчить про ефективне виділення його випромінювання в результаті динамічної спектральної фільтрації.

З використанням виразу (5) обчислена величина нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера, яка дорівнює $R = 0,98$. Незначна відмінність значення інформаційного показника узгодженості від одиниці пояснюється збіжністю оцінок статистичних характеристик сигналів об'єкта та фону.

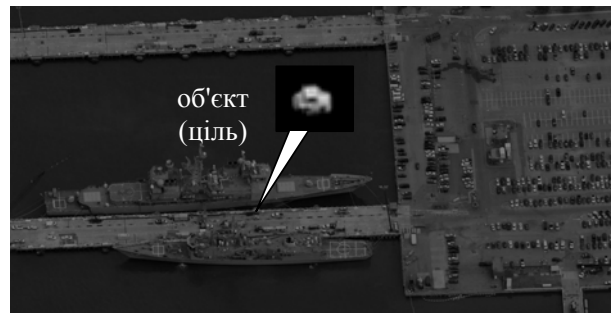


Рис. 2. Зображення після динамічної спектральної фільтрації

Задача друга. Припустимо, що статистичні характеристики вхідного і опорного сигналів об'єкта і фону відрізняються один від одного внаслідок зміни освітленості в ϵ раз при веденні спостереження. Тоді різниця математичних очікувань вхідних сигналів дорівнює $\bar{\xi}_{\text{вх}} = \epsilon \bar{\xi}_{\text{оп}}$, а кореляційна матриця вхідного сигналу фону визначається як $\Gamma_{\text{вх}} = \epsilon^2 \Gamma_{\text{оп}}$.

У процесі математичного моделювання при формуванні вхідного зображення яскравість кожного елемента вихідного зображення множилася на величину $\epsilon = 0,5$. Гістограма отриманого зображення (рис. 3, б) відрізняється від гістограми, наведеної на рис. 1, б, зменшеним в два рази діапазоном значень яскравості.

В результаті обробки отримане вихідне зображення, що має вигляд аналогічний вихідному зображенню для першої задачі (рис. 2). На цьому зо-

ображенні об'єкт (ціль) має підвищений контраст відносно фону.

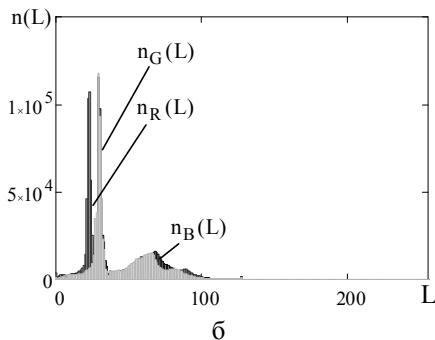
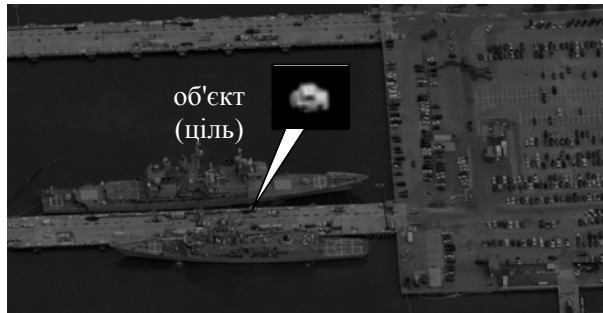


Рис. 3. Вхідне зображення (а), яскравість якого зменшена відносно опорного в два рази, та його гістограма (б)

З використанням виразу (5) обчислена нормована дивергенція Кульбака-Лейблера, величина якої дорівнює $R = 0,98$. Це підтверджує раніше отриманий висновок, що оптимальна обробка оптичних сигналів інваріантна до амплітудних характеристик вхідних сигналів [5].

Задача третя. Нехай статистичні характеристики вхідного оптичного сигналу фону відрізняються від характеристик опорного сигналу, що є наслідком структурних змін в зображенні фону. Цей випадок імітується зменшенням кількості кораблів на вхідному зображенні та зміною кольору одного з них (рис. 4, а). Гістограма зображення для цього випадку представлена на рис. 4, б. Її порівняння з гістограмою опорного зображення (рис. 1, б) показує про незначні зміни в каналі $n_R(L)$ в діапазоні значень яскравості від 200 до 255 відносних одиниць.

В результаті структурних змін на вхідному зображенні вектор математичне очікування вхідного сигналу фону відрізняється за напрямком від опорного на кут $2,5^\circ$. Напрямок найбільшої осі еліпсоїда розсіювання реалізацій фону також відхилився на $2,5^\circ$ від найбільшої осі опори.

Отримане в результаті математичного моделювання процесу оптимальної обробки вихідне зображення (рис. 5) свідчить про зниження якості розв'язання задачі селекції сигналу об'єкта. Як видно на зображенні, окрім сигналу об'єкта на вихід оптико-електронної системи з мінімальним ослабленням проходить оптичний сигнал корабля.

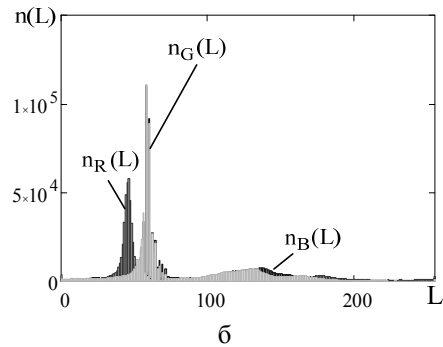
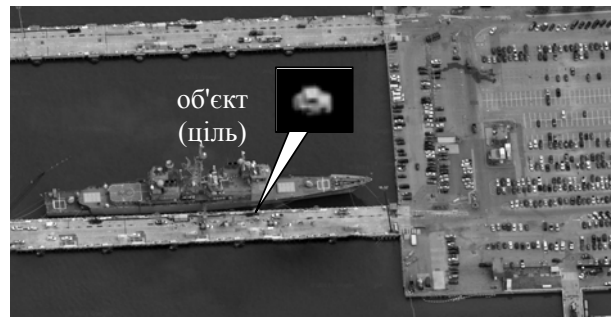


Рис. 4. Вхідне зображення, при різних значеннях опорних і вхідних сигналів фону (а) та його гістограма (б)



Рис. 5. Зображення після динамічної спектральної фільтрації при зміні вхідного сигналу фону

Обчислене значення нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера $R = 0,46$ кількісно підтверджує зниження ефективності оптимальної обробки оптичного випромінювання для випадку, коли статистичні характеристики опорного та вхідного сигналів фону відрізняються.

Таким чином, отримані в ході математичного моделювання процесу динамічної спектральної фільтрації оптичного випромінювання результати підтверджують працездатність інформаційного критерію оцінювання узгодженості оптимальної обробки оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Висновки

Проведено дослідження працездатності інформаційного критерію узгодженості оптимальної обробки оптичних сигналів шляхом математичного моделювання процесу динамічної спектральної фільтрації в оптико-електронних системах.

Показано, що у випадку, коли статистичні характеристики вхідних та опорних сигналів об'єкта та фону однакові, то значення інформаційного показника дорівнює $R = 0,98$. Відмінність значення нормованої дивергенції від одиничного значення можна пояснити інструментальною похибкою.

При розв'язанні другої задачі з використанням математичної моделі підтверджено одну з властиво-

стей оптимальної додетекторної обробки оптичного випромінювання, що полягає в інваріантності до амплітудних характеристик вхідних сигналів.

У випадку, коли відбулися структурні зміни у вхідному зображенні фону, інформаційний показник дорівнює $R = 0,46$. Це підтверджує можливість застосування інформаційного критерію для оцінювання узгодженості оптимальної обробки оптичних сигналів.

Список літератури

1. Shaw G. Signal processing for hyperspectral image exploitation / G. Shaw, D. Manolakis // *IEEE signal processing magazine*. – 2002. – Vol. 19 (1). – P. 12-16.
2. Manolakis D. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications / D. Manolakis, D. Marden, G. Shaw // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – Vol. 14 (1). – P. 79-113.
3. Landgrebe D. Hyperspectral image data analysis as a high dimensional signal processing problem / D. Landgrebe // *IEEE Signal Processing Magazin*. – 2002. – Vol. 19, No. 1. – P. 17-28.
4. 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.
5. Купченко Л.Ф. 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: научно-технический журнал*. – Х., 2011. – Том 10, №1. – С. 22-26.
6. Kupchenko L.F. Experimental research of dynamic spectral filtration using laser radiation interaction with multifrequency acoustic wave / L.F. Kupchenko, A.S. Rybiak, O.A. Goorin // *IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*. – 2016. – P. 157-160. doi: 10.1109/CAOL.2016.7851411.
7. Manolakis D. Is there a best hyperspectral detection algorithm? / D. Manolakis, R. Lockwood, T. Cooley, J. Jacobson // *Proc. of SPIE 7334, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XV*. – USA: SPIE, 2009. – Vol. 7334. – P. 733402 – 16. doi: 10.1117/12.816917.
8. Manolakis D. Hyperspectral detection algorithms: use covariances or subspaces? / D. Manolakis, R. Lockwood, T. Cooley, J. Jacobson // *Proc. of SPIE, Imaging Spectrometry XIV*. – USA: SPIE, 2009. – Vol. 7457. – P. 74570Q – 8. doi: 10.1117/12.828397
9. Fukunaga Keinosuke. Introduction to statistical pattern recognition / Keinosuke Fukunaga. – 2nd ed. – USA: Academic Press, 1990. – 607 p.
10. Tou J.T. Pattern Recognition Principles / J.T. Tou, R.C. Gonzalez. – MA, Reading: Addison-Wesley, 1974. – 377 p.
11. 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*. – Х.: 2015. – №1 (41). – С. 120-123.
12. Gonzalez R.C. Digital image processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, Inc., 2002. – 793 p.

References

1. Shaw, G.A. and Manolakis, D.G. (2002), Signal processing for hyperspectral image exploitation, *IEEE signal processing magazine*, Vol. 19, No. 1, pp. 12-16.
2. Manolakis, D., Marden, D. and Shaw, G. (2003), Hyperspectral image processing for automatic target detection applications, *Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 14, No.1, pp. 79-113.
3. Landgrebe, D.A. (2002), Hyperspectral image data analysis as a high dimensional signal processing problem, *IEEE Signal Processing Magazin*, Vol. 19, No. 1, pp. 17-28.
4. Kupchenko, L.F. and Rybiak, A.S. (2011), “Dinamicheskaya spektral'naya filtratsiya opticheskogo izlucheniya v opto-elektronnykh sistemakh” [The dynamic spectral filtration of optical radiation in electro-optical systems], *Electromagnetic waves and electronic systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 32-43.
5. Kupchenko, L.F., Rybiak, A.S., Proklov, V.V. and Antonov, S.N. (2011), “Obnaruzheniye ob'yektov po spektral'nykh priznakam v optiko-elektronnykh sistemakh s ispol'zovaniyem printsipov dinamicheskoy fil'tratsii” [Targets detection by spectral features in electro-optical systems by using the dynamic filtering principles], *Applied Radio Electronics*, Vol. 10, No. 1, pp. 22-26.
6. Kupchenko, L.F., Rybiak, A.S. and Gurin, O.A. (2016), “Experimental research of dynamic spectral filtration using laser radiation interaction with multifrequency acoustic wave”, *IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, pp. 157-160. <https://doi.org/10.1109/CAOL.2016.7851411>.
7. Manolakis, D., Lockwood, R., Cooley, T. and Jacobson, J. (2009), Is there a best hyperspectral detection algorithm?, *Proc. of SPIE 7334, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XV*, Vol. 7334, pp. 733402–16. <https://doi.org/10.1117/12.816917>.
8. Manolakis, D., Lockwood, R., Cooley, T. and Jacobson, J. (2009), Hyperspectral detection algorithms: use covariances or subspaces?, *Proc. of SPIE, Imaging Spectrometry XIV*, Vol. 7457, pp. 74570Q–8. <https://doi.org/10.1117/12.828397>.
9. Fukunaga, Keinosuke (1990), *Introduction to statistical pattern recognition*, Academic Press, USA, 607 p.
10. Tou, J.T. and Gonzalez, R.C. (1974), *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley, Reading, MA, 377 p.
11. Kupchenko, L.F. and Rybiak, A.S. (2015), “Kriteriyi soglasovannosti optimal'noy obrabotki signalov v optiko-elektronnykh sistemakh s dinamicheskoy spektral'noy fil'tratsiyey” [The matching criterion of optimal signal processing in electro-optical systems with dynamic spectral filtration], *Systems of Arms and Military Equipment*, Vol. 1(41), pp. 120-123.

12. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2002), *Digital image processing*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 793 p.

Надійшла до редколегії 30.01.2018

Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про авторів:

Купченко Леонід Федорович

доктор технічних наук професор
провідний науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8599-1944>
e-mail: kupch@meta.ua

Риб'як Анатолій Степанович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба?
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7922-3690>
e-mail: anattoliy@meta.ua

Гурін Олег Олександрович

кандидат технічних наук
науковий співробітник Харківського національного
університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7216-7497>
e-mail: goorin.oleg@gmail.com

Information about the authors:

Leonid Kupchenko

Doctor of Technical Sciences Professor
Lead Researcher of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8599-1944>
e-mail: kupch@meta.ua

Anatoliy Rybiak

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7922-3690>
e-mail: anattoliy@meta.ua

Oleg Goorin

Candidate of Technical Sciences
Research Associate of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7216-7497>
e-mail: goorin.oleg@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОПТИМАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМИРОВАННОЙ ДИВЕРГЕНЦИИ КУЛЬБАКА-ЛЕЙБЛЕРА

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

Построена математическая модель процесса оптимальной динамической спектральной фильтрации в оптико-электронных системах, которая позволяет исследовать свойства оптимальной спектральной фильтрации, а также проверить работоспособность информационного критерия для оценки ее согласованности. Приведены результаты математического моделирования оптимальной додетекторной обработки и определена степень ее согласованности для трех случаев: отсутствует рассогласование между входными и опорными сигналами; изменилось среднее значение яркости входных оптических сигналов объекта и фона; произошли изменения в спектральном составе входного оптического сигнала фона.

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

STUDY OF THE PROPERTIES OF OPTIMUM SPECTRAL FILTRATION OF OPTICAL RADIATION WITH THE USE OF THE NORMED KULLBACK-LEIBLER DIVERGENCE

L. Kupchenko, A. Rybiak, O. Goorin

The article is devoted to the study of the properties of the optimal dynamic spectral filtration in target detection electro-optical systems. The efficiency of optimal processing of optical signals depends on how correspondent the spectral characteristics of the input emissions of the target and the background to the information contained in the database are. Therefore, studies aimed at assessing the degree of signal matching in systems with dynamic spectral filtering are relevant. An information criterion the normalized Kulbak-Leibler divergence is used to assess the matching of optimal signal processing. The purpose of the article is to study the efficiency of the information criterion in order to estimate the matching of optimal processing of optical signals through mathematical modeling of the dynamic spectral filtration of radiation in electro-optical systems. Using the normalized Kulbak-Leibler divergence, the properties of optimal pre-detection processing of optical signals are studied. The examples show to what extent the differences in the statistical characteristics of input and reference signals affect the information matching indicator. In particular, the article poses and solves three problems that illustrate the process of optimal spectral filtration in the following situations: 1) the statistical properties of the input and reference signals coincide completely; 2) the mean brightness of the optical radiation of the target and the background at the input of the electro-optical system has changed; 3) the statistical characteristics of the background input signal differ from the reference values.

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