

Л.Ф. Купченко, Г.В. Худов, А.П. Гурін, А.С. Риб'як, О.О. Гурін, Б.А. Лісогорський

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО КРИТЕРІЮ (НОРМОВАНОЇ ДИВЕРГЕНЦІЇ КУЛЬБАКА-ЛЕЙБЛЕРА) ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН СПЕКТРАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація

Робота присвячена розробці методу, що дозволяє, використовуючи спектральні ознаки об'єктів, виявити зміни спектрального складу області виявлення, що спостерігається за допомогою оптико-електронної системи. Для виявлення відмінностей зображень у роботі використовується інформаційна міра віддаленості один від одного імовірнісних розподілів – інформаційна дивергенція Кульбака-Лейблера. Відмінність визначається за значенням інформаційного показника (нормованої дивергенції), яка представляє собою відношення дивергенції еталонного зображення та поточного.

Ключові слова: дивергенція Кульбака-Лейблера, оптико-електронна система, виявлення змін зображень, спектральний склад зображення.

Abstract

The work is devoted to the development of a method that allows, using the spectral characteristics of objects, to detect changes in the spectral composition of the detection area, which is observed with the help of an optical-electronic system. To detect differences in images, the work uses an informational measure of the distance of probability distributions from each other - Kullback-Leibler informational divergence. The difference is determined by the value of the information indicator (normalized divergence), which is the ratio of the divergence of the reference image and the current one.

Keywords: Kullback-Leibler divergence, electro-optical system, image change detection, image spectral composition.

Виявлення змін у зображенні – важлива задача в області обробки зображень. Практичне застосування дане завдання знаходить в системах автопілотування, індексування зображень і відео, охоронних системах та особливо у військовій сфері [1].

За останній час було створено низку методів виявлення змін зображень. Однак відомо, що жоден з них не є оптимальним і застосовним до всіх випадків [2].

Метою роботи є розробка методу, що дозволяє виявити зміни спектральної структури зображення з використанням нормованої інформаційної дивергенції Кульбака-Лейблера. Основною перевагою даного методу є отримання числового значення різниці математичних очікувань, що дає можливість оцінити чи відбулася зміна зображення і якою мірою.

Аналіз пристроїв виявлення та ідентифікації зображень об'єктів за спектральними ознаками з використанням оптико-електронних систем дозволяє зробити висновок, що для виявлення змін структури зображення необхідно використовувати детектори змін. Детектори змін включають досліджувані зображення та обчислювальний пристрій, що забезпечує цифрову обробку зображень з подальшою оцінкою отриманих результатів.

В якості ознак, які свідчать про зміну просторово статистичних властивостей спектральних зображень, у роботі використовується зміна їх інформативності. Інформативність зображення в оптико-електронних системах виявлення визначається кількістю інформації, яка може бути корисною для правильного поділу розподілів сигналів, що належать до класів ω_L та ω_R , відомою як інформаційна дивергенція Кульбака-Лейблера [3]. Інформаційна дивергенція (відносна ентропія), є математичним очікуванням відношення правдоподібності і використовується в завданнях статистичної обробки для роздільності двох класів за різницею їх математичних очікувань:

$$D = \int_{\mathfrak{R}} p(\bar{X} / \omega_L) \ln \frac{p(\bar{X} / \omega_L)}{p(\bar{X} / \omega_R)} d\bar{X} - \int_{\mathfrak{R}} p(\bar{X} / \omega_R) \ln \frac{p(\bar{X} / \omega_L)}{p(\bar{X} / \omega_R)} d\bar{X}, \quad (1)$$

де $p(\bar{X} / \omega_L)$ – щільність ймовірності прийнятої реалізації за наявності сигналу класу ω_L ;
 $p(\bar{X} / \omega_R)$ – щільність ймовірності прийнятої реалізації за наявності сигналу класу ω_R ;
 $\ln p(\bar{X} / \omega_L) / p(\bar{X} / \omega_R)$ – відношення правдоподібності для класів ω_L та ω_R .

Метод виявлення змін у структурі зображень полягає в порівняльному аналізі, який здійснюється за величиною статистичних розподілів сигналів двох класів ω_L та ω_R , що належать до двох зображень – О (еталонного) та Т (поточного).

Метод включає наступні операції:

По-перше: в результаті реєстрації випромінювання деякого предметного простору формується два повнокольорових цифрових RGB зображення. Одне з них приймається за еталонне, а інше – за поточне.

По-друге: у кожному із зображень необхідно виділити дві однаково симетрично розташовані ділянки з однаковою кількістю пікселів та ансамблями сигналів, що належать до класів ω_L (складає ліву частину зображення) та ω_R (складає праву частину зображення).

По-третє: відповідно до кольорової моделі RGB 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, які виміряні в червоному (R-red), зеленому (G-green) та синьому (B-blue) спектральних каналах.

Використовуючи цифрову обробку зображень, слід обчислити в зображеннях О та Т міру віддаленості один від одного двох ймовірнісних розподілів, що належать до класів ω_L та ω_R та підкоряються нормальному закону з відповідними щільностями ймовірності.:

$$p(\bar{X} / \omega_L) = N(\bar{\mu}_L, \Gamma_L); \quad (2)$$

$$p(\bar{X} / \omega_R) = N(\bar{\mu}_R, \Gamma_R), \quad (3)$$

де $\bar{\mu}_L$ та $\bar{\mu}_R$ – математичні очікування спектрального складу лівої та правої частини зображення; Γ_L та Γ_R – кореляційні матриці спектрального складу лівої та правої частини зображення.

По-четверте: для застосування методу виявлення змін спектральної структури поточного зображення Т по відношенню до еталонного О необхідно скористатися наступними виразами, отриманими на основі виразу (1):

$$D_O = \frac{1}{2} \left[\bar{\xi}_O^T (\Gamma_{O_L}^{-1} + \Gamma_{O_R}^{-1}) \bar{\xi}_O + tr(\Gamma_{O_L} \Gamma_{O_R}^{-1} + \Gamma_{O_R} \Gamma_{O_L}^{-1} - 2I) \right]; \quad (4)$$

$$D_T = \frac{1}{2} \left[\bar{\xi}_T^T (\Gamma_{T_L}^{-1} + \Gamma_{T_R}^{-1}) \bar{\xi}_T + tr(\Gamma_{T_L} \Gamma_{T_R}^{-1} + \Gamma_{T_R} \Gamma_{T_L}^{-1} - 2I) \right], \quad (5)$$

де $\bar{\xi}_O = \bar{\mu}_{O_L} - \bar{\mu}_{O_R}$ – вектор різниці математичних очікувань сигналів лівої та правої частин еталонного зображення; $\bar{\xi}_T = \bar{\mu}_{T_L} - \bar{\mu}_{T_R}$ – вектор різниці математичних очікувань сигналів лівої та правої частин поточного зображення; I – одинична матриця; $tr(\bullet)$ – слід матриці; Γ_{O_L} та Γ_{O_R} – кореляційні матриці спектрального складу лівої та правої частин еталонного зображення; Γ_{T_L} та Γ_{T_R} – кореляційні матриці спектрального складу лівої та правої частин поточного зображення.

По-п'яте: слід зробити розрахунок нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера (зробити порівняння отриманих дивергенцій) за виразом:

$$R = D_O / D_T. \quad (6)$$

Якщо величина дивергенції Кульбака-Лейблера в зображеннях однакова, то зміни в структурі цих зображень відсутні і нормована дивергенція буде дорівнювати $R = D_O / D_T \approx 1$. У випадку, коли величини дивергенції Кульбака-Лейблера в зображеннях не однакові, то структура поточного зображення по відношенню до еталонного зображення зазнала змін та нормована дивергенція буде дорівнювати $R = D_O / D_T \neq 1$.

Припустимо, що мається кольорове еталонне зображення (рис. 1). На ньому зображена автомобільна стоянка з розташованими на ній автомобілями. Дане зображення отримане за допомогою цифрового фотоапарату, який було встановлено на літальному апараті. Знімок зроблений в простих метеоумовах та містить 2880×2346 елементів роздільної здатності (пікселів). Використавши вираз (4), зробимо розрахунок величини дивергенції Кульбака-Лейблера. Отримаємо, що $D_O = 6,165$.

Припустимо, що мається поточне зображення №1 (рис. 2), яке буде точно дорівнювати еталонному (зміни в структурі поточного зображення по відношенню до еталонного відсутні). Використавши вираз (5), зробимо розрахунок величини дивергенції Кульбака-Лейблера поточного зображення №1. Отримаємо, що $D_1 = 6,165$. Використавши вираз (6), зробимо розрахунок нормованої дивергенції: $R_1 = D_O / D_1 = 6,165 / 6,165 = 1$.



Рис. 1. Еталонне зображення



Рис. 2. Поточне зображення №1

Розглянемо низку випадків, у яких відбулася зміна спектральної структури поточне зображення по відношенню до еталонного.

Припустимо, що маються: поточні зображення №2, №3, №4, №5, №6 (рис. 3-7). Ці зображення відрізняються від еталонного зображення. Місця стоянки, звільнені від автомобілів, позначені контурами квадратів.

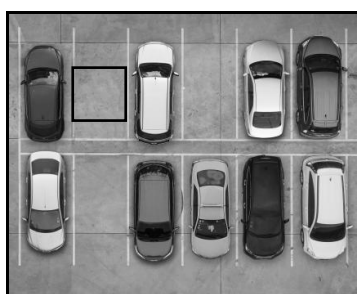


Рис. 3. Поточне зображення №2

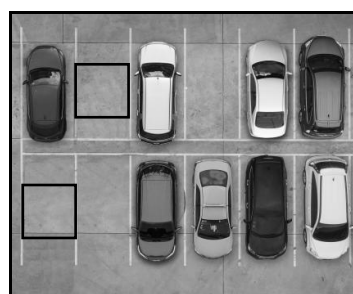


Рис. 4. Поточне зображення №3

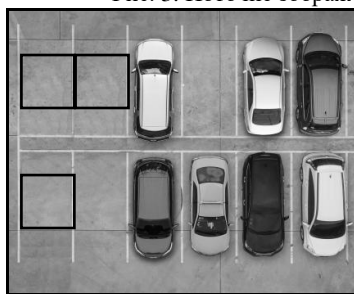


Рис. 5. Поточне зображення №4

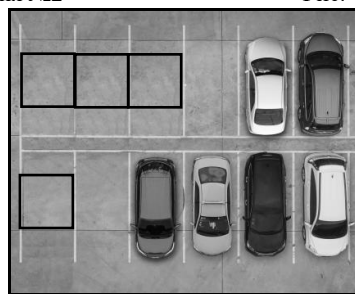


Рис. 6. Поточне зображення №5

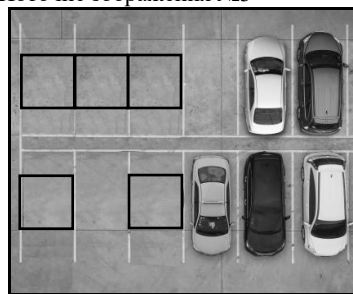


Рис. 7. Поточне зображення №6

Використавши вираз (5), зробимо розрахунок величини дивергенції Кульбака-Лейблера цих зображень. Отримаємо:

$$D_2 = 6,452, D_3 = 7,537, D_4 = 7,553, D_5 = 30,328, D_6 = 92,609.$$

Слід відмітити, що в цих випадках про відмінність цих зображень від еталонного свідчить не тільки їх візуальний аналіз, але й чисельний розрахунок структури цих зображень.

Незначна зміна величини дивергенції поточного зображення №4 по відношенню до величини дивергенції поточного зображення №3 можна пояснити кольором автомобіля, який залишив місце своєї стоянки. Він має червоне забарвлення. Асфальтове покриття стоянки також має складову переважно червоного кольору. Тому незначна зміна кількості пікселів червоного відтінку призвело до незначної зміни величини дивергенції.

Відповідно, значення нормованої дивергенції буде дорівнювати:

$$R_2 = D_0 / D_2 = 6,165 / 6,452 = 0,956;$$

$$R_3 = D_0 / D_3 = 6,165 / 7,537 = 0,818;$$

$$R_4 = D_0 / D_4 = 6,165 / 7,553 = 0,816;$$

$$R_5 = D_0 / D_5 = 6,165 / 30,328 = 0,203;$$

$$R_6 = D_0 / D_6 = 6,165 / 92,609 = 0,067.$$

На рисунку (рис. 8) представлений графік, що ілюструє залежність нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера (відношення величин дивергенції Кульбака-Лейблера поточного та еталонного зображень) від зміни кількості елементів зображення (автомобілів, які залишили місце стоянки), що характеризується кількістю змінених елементів (пікселів) в порівнянні з еталонним зображенням.

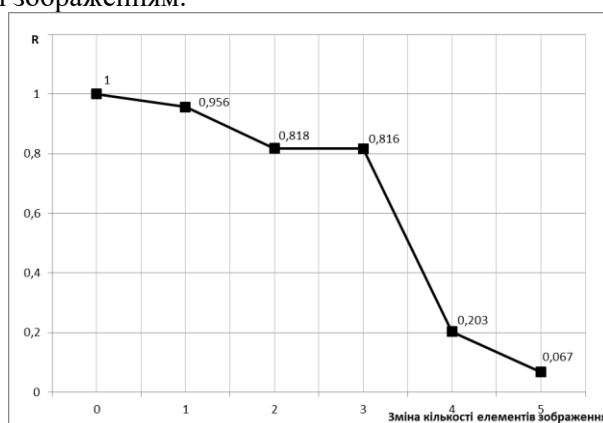


Рис. 8. Графік залежності нормованої дивергенції Кульбака-Лейблера від зміни кількості елементів зображення

Отже, проаналізувавши результати математичного моделювання, можна зробити наступні висновки:

1. Метод дозволяє виявити зміни спектрального складу області виявлення, отриманих з використанням оптико-електронної системи.

2. Величина дивергенції Кульбака-Лейблера прямо пропорційна кількості змінених елементів зображення (пікселів). Вона в числовому значенні характеризує на скільки поточне зображення відрізняється від еталонного, при чому ця різниця особливо відчутна, коли кількість змінених елементів (автомобілів) перевищує 50% від кількості елементів (автомобілів) лівої частини еталонного зображення (рис. 7).

3. Чим більше поточне зображення відрізняється від еталонного, тим більше від одиниці буде відрізнятися значення нормованої дивергенції.

Робота присвячена розробці методу, який дозволяє, використовуючи спектральні ознаки об'єктів, виявити зміни в структурі зображень отриманих з використанням оптико-електронної системи. Відмінність виявляється за значенням інформаційного показника (нормованої дивергенції), що являє собою відношення дивергенції еталонного зображення та поточного. Проведено математичне моделювання методу виявлення змін у структурі багатоспектральних

зображень. Показано, що якщо відмінність між двома зображеннями відсутня, то нормована дивергенція дорівнює одиниці. Відповідно, чим більше поточне зображення відрізняється від еталонного, тим більше від одиниці буде відрізняться значення нормованої дивергенції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борзов А. Б., Лихоеденко К. П., Муратов И. В., Павлов Г. Л., Сучков В. Б. Анализ селективных признаков наземных радиолокационных целей. *Журнал радиоэлектроники*. 2009. №9. С. 3-16. <http://jre.cplire.ru/win/sep09/2/text.pdf>.
2. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. No. 12. P. 2365–2407. <https://www.researchgate.net/publication/235245895>.
3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Москва : Наука, 1979. 367 с.

Купченко Леонід Федорович - доктор технічних наук професор, старший викладач кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: kupchenko.leonid@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8599-1944>.

Худов Геннадій Володимирович - доктор технічних наук, професор, начальник кафедри тактики радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: 2345kh_hg@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>.

Гурін Артем Петрович - ад'юнкт (штатний) науково-організаційного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: tema0504@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8536-4924>.

Риб'як Анатолій Степанович - кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу (розвитку, підготовки та застосування угруповань Повітряних Сил) науково-дослідного управління (розвитку і застосування Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: anattoliy@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7922-3690>.

Гурін Олег Олександрович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри озброєння радіотехнічних військ факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: Goorin.oleg@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7216-7497>.

Лісогорський Богдан Анатолійович - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету радіотехнічних військ протиповітряної оборони Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, e-mail: lisogorskiy.b@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5345-0345>.

Kupchenko Leonid F. - Doctor of Engineering Science Professor, Senior Lecturer of the Department of Physics and Radioelectronics of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: kupchenko.leonid@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8599-1944>.

Khudov Hennadii V. - Doctor of Engineering Science Professor, Head of the Department of Tactics of the Radio Technical Forces Faculty of Radio Engineering of the Air Defense Forces of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: 2345kh_hg@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>.

Hurin Artem P. - Post-Graduate (full-time) of the scientific and organizational department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: tema0504@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8536-4924>.

Rybiak Anatoly S. - PhD in Engineering, leading researcher of the research department (development, training and application of Air Force groups) of the research department (development and application of the Air Force) of the Air Force Research Center of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: anattoliy@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7922-3690>.

Goorin Oleg O. - PhD in Engineering, Senior Lecturer of the Department of Weapons of Radio-Technical Forces Faculty of Radio Engineering of the Air Defense Forces of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University, Kharkiv, e-mail: Goorin.oleg@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7216-7497>.

Lisogorskiy Bohdan A. - PhD in Engineering, senior researcher of the research laboratory Faculty of Radio Engineering of the Air Defense Forces of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University, Kharkiv, e-mail: lisogorskiy.b@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5345-0345>.