

УДК 621.384.3

В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, М.С. Мамута

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ

The article proposes the methodology for performance evaluation of MOESS with image fusion. This methodology combines probability of detection, recognition and identification with image fusion quality metric – targeting task performance. This metric takes into account the image formation process in single channel of MOESS, image fusion and human visual perception. Simulation results are well correlated with subjective tests. The proposed methodology allows matching the best image fusion method for current operating conditions. Shift invariant wavelet transform, discrete wavelet transform and Laplacian pyramid yield the best results among the analyzed methods. Simulation results show that nominal static range of MOESS can be raised to 10 % using the image fusion in good atmospheric conditions.

Вступ

Багатоканальні оптико-електронні системи спостереження (БОЕСС) містять кілька різних інформаційних каналів (як мінімум телевізійний (ТВ) і тепловізійний (ТПВ)), функціонально поєднаних між собою, а також з бортовим комп'ютером, системами зв'язку, навігації та з іншими датчиками [1]. БОЕСС дають можливість проводити цілодобові, всепогодні спостереження, виявлення, супровід об'єктів різного базування, розвідку, оцінювання екологічного стану, виявлення та моніторинг надзвичайних ситуацій.

БОЕСС належать до іконічних систем, тобто споживачем кінцевої інформації є оператор. Для об'єднання інформації з різних датчиків у БОЕСС використовують комплексування. Це підвищує інформативність результуючого зображення порівняно із зображеннями, отриманими в окремих каналах БОЕСС, покращує усвідомлення ситуації оператором і збільшує ефективність системи в цілому. Для оцінки якості комплексованого зображення існує ряд показників [2–4]. Ці показники добре корелюють із суб'єктивним сприйняттям зображення оператором, але не дають можливості оцінити процеси перетворення інформації в різних каналах і їх внесок у загальну ефективність системи. З іншого боку, є багато напрацювань щодо оцінювання ефективності функціонування окремих каналів БОЕСС [5, 6], які дають змогу детально дослідити вплив параметрів блоків системи на характеристики зображення, сформованого в одному каналі. Тобто на сьогодні можливі як оцінка якості комплексування, так і оцінка ефективності окремих каналів БОЕСС, але абсолютно незалежно та без прив'язки одна до одної.

Отже, доцільно розробити методику, яка давала б змогу об'єднати показники якості комплексованого зображення з показниками ефективності окремих каналів БОЕСС для того, щоб оцінити ефективність всієї системи при комплексуванні інформації різних каналів.

Імовірність сприйняття ТПВ/ТВ-зображення є складною функцією, що залежить від характеристик об'єкта спостереження (відношення сигнал/шум, контрасту, кутових розмірів, форми, розміщення, орієнтації та швидкості руху на екрані); характеристик загального зображення на екрані дисплея (яскравості фону, щільності та складності завад, розмірів екрана); характеристик БОЕСС (передавальної функції та пов'язаних із нею показників просторового розділення, частоти кадрів, кількості рядків, кутових розмірів екрана, передачі сірої шкали градацій яскравості, динамічного діапазону); характеристик спостерігача (особливостей зору, тренованості, інтелекту). Отже, показник якості комплексованого зображення має враховувати всі ланки інформаційного комплексу “фоново-цільова обстановка–БОЕСС–оператор”. Крім того, доцільно врахувати традиційний підхід до оцінки ефективності одноканальних БОЕСС за допомогою такої “споживчої” характеристики, як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Остаточо можна стверджувати, що для оцінки ефективності функціонування БОЕСС необхідно розробити показник, який враховує як процеси формування зображень в окремих каналах, так і особливості комплексування інформації та зорового сприйняття зображення оператором. За основу такого показника можна взяти один із найбільш адекватних на сьогодні – показник успішності виконання завдання (*TTP* – targeting task performance metric) [7]. Цей показник ви-

користують замість критерію Джонсона для аналізу сучасних БОЕСС з дискретизацією та цифровою обробкою зображень.

Постановка задачі

Метою досліджень є оцінка ефективності БОЕСС при комплексуванні інформації, отриманої в її каналах, на основі показника успішності виконання завдання за допомогою ймовірнісних характеристик виявлення, розпізнавання та ідентифікації.

Визначення ймовірності виявлення, розпізнавання й ідентифікації БОЕСС з комплексуванням інформації

Ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта БОЕСС можна розрахувати за формулою [8]:

$$P_3(R) = \frac{\left(\frac{V_k(R)}{V_{50}}\right)^{E(R)}}{1 + \left(\frac{V_k(R)}{V_{50}}\right)^{E(R)}}, \quad (1)$$

де $V_k(R) = \frac{\sqrt{A} \cdot TTP_k}{R}$ – число пар штрихів, що розміщуються на об'єкті; TTP_k – показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням; A – площа об'єкта; R – відстань від об'єкта до БОЕСС; V_{50} – число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50% ймовірності правильного розв'язку залежно від змісту задачі; $E(R) = 1,51 + 0,24[V_k(R)/(V_{50})]$ – емпірично визначена константа, що залежить від спектрального діапазону та відношення $V_k(R)/V_{50}$.

Основними завданнями спостерігача є візуальне виявлення, розпізнавання, ідентифікація. Визначення показника успішності виконання завдання для системи з комплексуванням залежатиме від методу комплексування. Зокрема, для методів із перетворенням масштабу показник успішності виконання завдання буде розраховуватись на кожному рівні розкладу. Тобто діапазон частот, спільний для кількох каналів БОЕСС, розбивається на піддіапазони (октави) відповідно до кількості рівнів розкладу зображень, і розраховуються значення показника в кожному піддіапазоні.

Показник успішності виконання завдання пропонуємо визначати таким чином:

$$TTP_k = \sum_l (TTP_{1,l} \cdot R_{1,l} + TTP_{2,l} \cdot R_{2,l} + \dots + TTP_{k,l} \cdot R_{k,l}), \quad (2)$$

де $TTP_{k,l}$ – показник успішності виконання завдання k -го зображення l -ї октави; $R_{k,l} = r_{k,l}^F \cdot \prod_k (1 - |r_{k,l}|)$ – коефіцієнт пропорційності; $r_{k,l}$ – кореляція Пірсона між вхідними зображеннями; $r_{k,l}^F$ – кореляція Пірсона між комплексованим і k -м вхідним зображенням.

Кореляцію Пірсона між комплексованим зображенням і вхідними розраховуємо за формулою [9]:

$$r_{k,l}^F = \frac{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})(L_{k,l} - \overline{L_{k,l}})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})^2 \sum_m \sum_n (L_{k,l} - \overline{L_{k,l}})^2}}, \quad (3)$$

де $F_{k,l}$ – матриця значень яскравості комплексованого зображення в l -й октаві просторової частоти; $L_{k,l}$ – матриця значень яскравості k -го вхідного зображення в l -й октаві просторової частоти; $\overline{L_{k,l}}$ – усереднене значення яскравості зображення в октаві.

Кореляцію Пірсона між вхідними зображеннями знаходимо за аналогією з $r_{k,l}^F$.

Показник успішності виконання завдання для окремих зображень в одновимірному випадку можна визначити як [8]

$$TTP_{k,l} = \int_{f_{xH}}^{f_{xB}} \left(\frac{C_{\Pi}(f_x)}{\Phi_{ПК_{ОЕС}}(f_x)} \right)^{1/2} df_x, \quad (4)$$

де f_x – горизонтальна просторова частота (мрад⁻¹); $\Phi_{ПК_{ОЕС}}(f_x)$ – функція порогового контрасту (ФПК) системи; $C_{\Pi}(f_x)$ – перетворення Фур'є від зображення об'єкта на дисплеї.

ФПК системи за наявності шумів дисплея можна визначити таким чином [10]:

$$\Phi_{ПК_{ОЕС}}(f_x) = \frac{\Phi_{ПК_{ока}}(f_e)}{МП\Phi_d(f_x)M_{ОС}(f_x)M_{МПВ}(f_x)} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{\alpha^2 \sigma^2 QH_{\text{гор}}(f_x) QV_{\text{гор}}}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

де ФПК_{ока}(f_e) – ФПК ока спостерігача при спостереженнях з екрана; f_e – просторова частота на сітківці; $M_{\text{OC}}(f_x)$, $M_{\text{МПВ}}(f_x)$, $\text{МПФ}_d(f_x)$ – модуляційні передавальні функції (МПФ) оптичної системи, матричного приймача випромінювання (МПВ) та дисплея відповідно; $QH_{\text{гор}}(f_x)$ – горизонтальна та $QV_{\text{гор}}$ – вертикальна шумові смуги для одновимірної синусоїдальної тестової міри; σ – середнє квадратичне значення шуму дисплея; α – коефіцієнт пропорційності; L – середня яскравість дисплея.

Оцінимо ефективність двоканальної ОЕСС у складі типових каналів – ТВ і ТПВ.

Основою ТПВ-каналу є камера зовнішнього спостереження Thermal-eye, а ТВ-каналу – камера РІН 750А. Параметри камер наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри каналів ТВ і ТПВ

Ланка ОЕСС	Параметри	ТВ-канал	ТПВ-канал
Оптична система	Діаметр вхідної зіниці, мм	22	26
	Фокусна відстань, мм	50	16
МПВ	Розмір пікселя, мкм ²	7×7	30×30
	Робочий спектральний діапазон, мкм	0,42–0,76	8–12
	Формат	500×582	320×240

Для моделювання об'єкта скористаємось стандартом НАТО 4347, згідно з яким тест-об'єктом є АЧТ, що має розмір 2,3×2,3 м² з температурним контрастом $\Delta T = 2\text{ K}$ на фоні температурою $T_b = 288\text{ K}$. В цьому ж стандарті визначено показник ослаблення атмосфери $\alpha = 0,2\text{ км}^{-1}$ (за хороших погодних умов).

МПФ оптичної системи, вважаючи, що вона дифракційно обмежена, знаходимо за формулою, наведеною в [6], МПФ МПВ і дисплея – в [6], МПФ ока – в [7], ФПК ока – в [11], шумові смуги – в [10]. Вхідними даними для розрахунків будуть [8, 10]: коефіцієнт пропорційності для ТПВ-каналу $\alpha = 862\sqrt{\text{Гц}}$, коефіцієнт пропорційності для ТВ-каналу $\alpha = 169,6\sqrt{\text{Гц}}$, $\sigma = 0,02\text{ с}\cdot\text{мрад}^2\text{кд}/\text{м}^2$, середня яскравість дисплея – 17 кд/м².

Скориставшись формулами (4) і (5), знаходимо діапазон частот, який передається ТВ-каналом (від 0 до 6,5 мрад⁻¹), діапазон частот, що передається ТПВ-каналом (від 0 до 0,53 мрад⁻¹), а також спільний для обох каналів діапазон частот (від 0 до 0,53 мрад⁻¹).

Отримані сигнали комплексуються різними методами. Оцінимо двоканальну ОЕСС з використанням таких найбільш уживаних методів комплексування, як метод усереднення, метод головних компонент, піраміда Лапласа, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, контрастна піраміда, піраміда ФВП (фільтрація–віднімання–проріджування), вейвлет-перетворення, інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення.

Для оцінювання методу усереднення та методу головних компонент (методів без перетворення масштабу) визначаємо показник успішності виконання завдання в діапазоні частот, що передаються. В результаті інтегрування згідно з формулою (4) отримуємо: для ТПВ-каналу в діапазоні частот від 0 до 0,53 мрад⁻¹ – $TTP = 4,98$; для ТВ-каналу в діапазоні частот від 0 до 0,53 мрад⁻¹ – $TTP = 2,5$, у діапазоні частот від 0,53 до 6,5 мрад⁻¹ – $TTP = 34$.

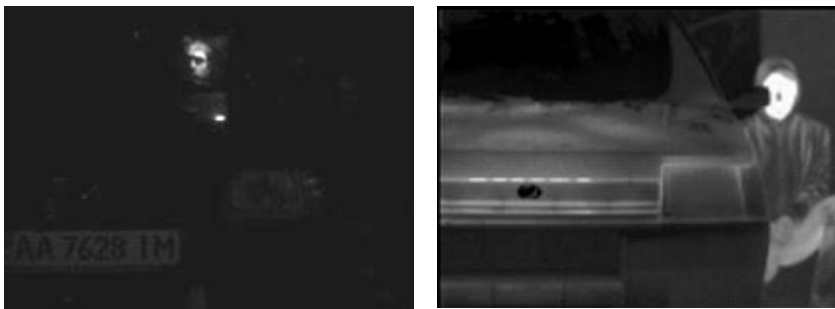
Решта методів є методами з перетворенням масштабу. Для них діапазон частот від 0 до 0,53 мрад⁻¹ розбиваємо на октави. При 4-рівневому розкладі для цих методів комплексування октав також буде чотири.

У табл. 2 наведені значення показника успішності виконання завдання ТВ- і ТПВ-каналів для 4-х октав.

Таблиця 2. Показник успішності виконання завдання ТВ- і ТПВ-каналів для 4-х октав

Канал	Октави			
	L_1	L_1	L_1	L_1
ТВ	2,5	1,64	0,9	0,32
ТПВ	4,98	4,08	2,57	0,999

Для подальших розрахунків недостатньо тільки параметрів ОЕСС і зорової системи спостерігача – необхідні реальні зображення. Для прикладу скористаємось ТВ- і ТПВ-зображеннями (рис. 1), отриманими за допомогою камер Thermal-eye і РІН 750А. Як видно з рисунка, на ТПВ-зображенні чітко видно людину біля автомобіля, але відсутня інформація про об'єкти в салоні автомобіля. На ТВ-зображенні чітко видно людину в салоні автомобіля, крім того, можна розрізнити номер авто.



а

б

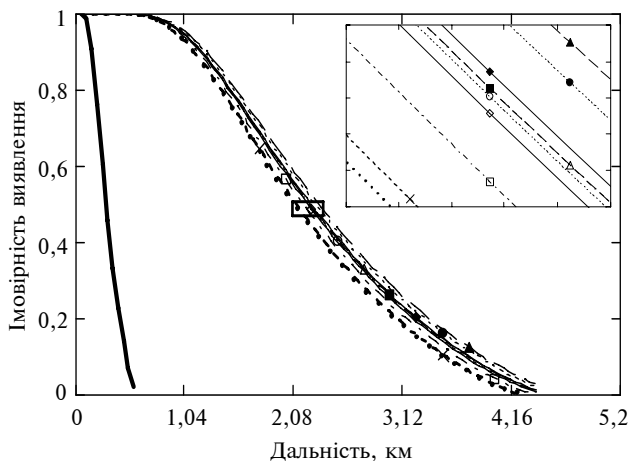
Рис. 1. Зарестровані зображення: а – телевізійне; б – тепловізійне

За допомогою пакета Matlab знаходимо кореляцію Пірсона між комплексованим і ТВ-зображенням, а також між комплексованим і ТПВ-зображенням у кожній октаві за формулою (3).

Таблиця 3. Показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням за використання різних методів комплексування

№	Метод комплексування	Значення показника
1	Градiєнтна піраміда	36,8
2	Контрастна піраміда	37,9
3	Піраміда ФВП	38,7
4	Метод усереднення	38,9
5	Морфологічна піраміда	39
6	Метод головних компонент	39
7	Піраміда Лапласа	39,2
8	Вейвлет-перетворення	40
9	Інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення	40,5

Після підстановки отриманих значень і даних табл. 2 у формулу (2) знаходимо показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням. Результати розрахунків подано в табл. 3.



Обговорення результатів

Згідно з розрахунками, найкращі результати дають: інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення та піраміда Лапласа. Далі йдуть морфологічна піраміда, метод головних компонент, метод усереднення, піраміда ФВП, контрастна піраміда та градiєнтна піраміда.

Очевидно, що ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта двоканальною ОЕСС, розраховані за формулою (1) для різних відстаней спостереження, також відповідатимуть зазначеному порядку. Графіки цих залежностей при числі штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильного виявлення – $V_{50} = 2,7$, розпізнавання – $V_{50} = 14,5$, ідентифікації – $V_{50} = 18,8$ [7], показані на рис. 2–4 (номери методів згідно з табл. 3). З рисунків видно, що комплексування дає змогу підвищити ефективність двоканальної ОЕСС порівняно з ефективністю окремих каналів: на комплексованому зображенні можна зафіксувати обидва об'єкти (людину в автомобілі та біля нього) і розпізнати номер автомобіля. Зображення кращої якості дають такі методи комплексування, як інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення та піраміда Лапласа.

Згідно з даними суб'єктивних експертиз, найкращі зображення дають інваріантне до зсувів вейвлет-перетворення, дискретне вейвлет-перетворення та піраміда Лапласа [12], що повністю збігається з результатами моделювань. Дещо суперечливою є оцінка методу головних компонент. Адже, згідно з даними суб'єктивних експертиз, цей метод дає зображення найгіршої якості. Тому необхідне більш ґрунтовне дослідження цього методу або уточнення розрахунків для методів без перетворення масштабу.

Рис. 2. Імовірність виявлення об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування:

- ТПВ-канал; ••• – ТВ-канал;
- ×— двоканальна ОЕСС, метод № 1;
- двоканальна ОЕСС, метод № 2;
- ◇— двоканальна ОЕСС, метод № 3;
- двоканальна ОЕСС, метод № 4;
- △— двоканальна ОЕСС, метод № 5;
- двоканальна ОЕСС, метод № 6;
- ◆— двоканальна ОЕСС, метод № 7;
- двоканальна ОЕСС, метод № 8;
- ▲— двоканальна ОЕСС, метод № 9

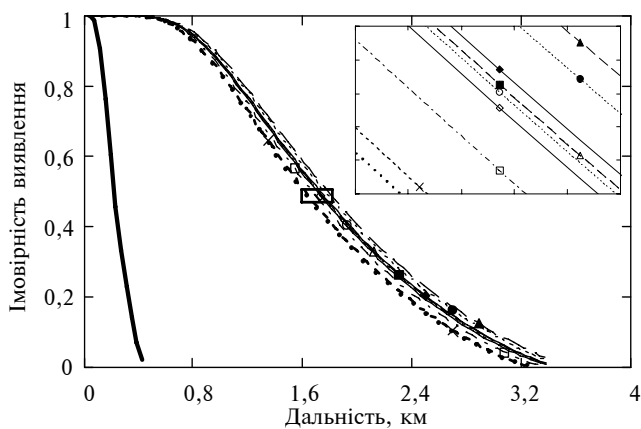


Рис. 3. Імовірність розпізнавання об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування

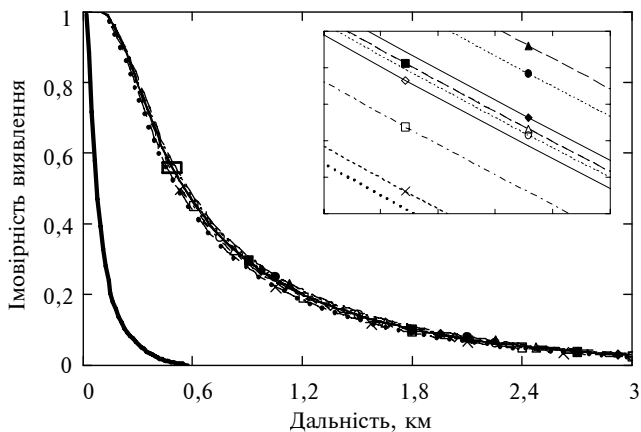


Рис. 4. Імовірність ідентифікації об'єкта двоканальною ОЕСС за різних методів комплексування

Висновки

Розроблена методика оцінки ефективності функціонування БОЕСС з комплексуванням інформації поєднує таку споживчу характеристику ОЕСС, як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації, з показником якості комплексованого зображення – показником успішності виконання завдання. Цей показник дає змогу врахувати особливості проходження сигналу через всі ланки інформаційного комплексу “фоново-цільова обстановка–БОЕСС–оператор”, особливості процесу комплексування зображень і зорового сприйняття зображення оператором.

Запропонована методика дає можливість вибирати найкращий для даних умов функціонування БОЕСС метод комплексування. Результати моделювань показують, що комплексування дає змогу в середньому на 10 % підвищити максимальну дальність дії БОЕСС за хороших погодних умов спостереження. Це підтверджується суб'єктивними оцінками при спостереженнях у лабораторних умовах.

У подальшому планується дослідити ефективність БОЕСС із комплексуванням інформації за несприятливих погодних умов, таких як дощ, сніг, туман, а також за наявності димових перешкод.

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
2. G. Qu et al., “Information measure for performance of image fusion”, *Electronic Let.*, vol. 38, no. 7, pp. 313–315, 2002.
3. S. Gabarda and G. Cristybal, “Blind image quality assessment through anisotropy”, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 24, no. 12, pp. B42–B51, 2007.
4. C.S. Xydeas and V. Petrovic, “Objective image fusion performance measure”, *Electronics Let.*, vol. 36, no. 4, pp. 308–309, 2000.
5. Колобродов В.Г., Лихолім М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
6. G.C. Holst, *Electro-optical imaging system performance*, 2nd ed. Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2000, 438 p.
7. R.H. Vollmerhausen and E. Jacobs, “The Targeting Task Performance Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance”, *Tech. Rep.*, AMSEL-NV-TR-230, 119 p, 2003.
8. R.H. Vollmerhausen et al., *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. – Washington: SPIE Press, 2010, 304 p.
9. J.L. Rodgers and W.A. Nicewander, “Thirteen ways to look at the correlation coefficient”, *Am. Stat.*, vol. 42, no. 1, pp. 59–66, 1988.
10. R.H. Vollmerhausen et al., “New metric for predicting target acquisition performance”, *Opt. Eng.*, vol. 43, no. 11, pp. 2806–2818, 2004.
11. P.G.J. Barten, “Formula for the contrast sensitivity of the human eye”, *Proc. SPIE*, vol. 5294, pp. 231–238, 2004.
12. Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2011. – № 4. – С. 57–62.