УДК 004.932

О. С. Єлманова
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА КОНТРАСТУ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ

Проведено порівняльний аналіз визначень ядер контрасту для кількісної оцінки контрасту окремих комбінацій елементів зображення. Наведено результати дослідження впливу лінійних перетворень шкали яскравості зображення на значення ядер контрасту для різних визначень. Запропоновано вираз для ядра контрасту, який інваріантний до лінійних перетворень шкали яскравості зображення і задовольняє вимоги асиметричності, рівноправності входження аргументів однозначності й визначеності умов рівності нулю і досягнення екстремальних значень.

Ключові слова: контраст, ядро контрасту, кількісна оцінка контрасту, лінійні перетворення шкали яскравості.

E. S. Yelmanova
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electronics and Computer Technologies

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CONTRAST OF THE IMAGE ELEMENTS

One of the main tasks of image preprocessing is to improve the quality of images.

The image quality is characterized by several characteristics. One of the main objective characteristics among them is the image contrast. The image contrast is considered as a dimensionless value that characterizes (quantitatively or qualitatively) a significant or noticeable difference between characteristics of different areas of the image.

The total image contrast is determined generally considering the contrast of particular combinations of elements of the image (objects and background).

Several approaches for determination the contrast value of the image elements (the kernels of contrast) which are used in different applications are known. The great variety of definitions of contrast is very inconvenient. Such situation complicates the solution of many applied tasks as well as it complicates the carrying out comparative analysis of the achieved results for different methods of image contrast enhancement.

A significant disadvantage of the known definitions of the contrast value of image elements (the kernels of contrast) is their dependence on linear transformations of the brightness scale of image.

A comparative analysis of various definitions for quantitative assessment of the image contrast was held. The results of the research of the influence of linear transformations of image brightness scale on the value of quantitative assessment of the contrast for different definitions are given.

Generalized definition and linear definition of the contrast of the image elements on the base of existing requirements for contrast determination under condition of their invariance to linear transformations of the brightness scale are proposed.

Proposed generalized definition and linear definition of contrast of the image elements meet the requirements of asymmetry, equality of entering arguments, uniqueness and certainty of conditions under which equality to zero and extreme values of contrast are achieved. The linear description of contrast satisfies the condition of proportionality of contrast value to the increment of the argument values.

The interconnection of the offered contrast definition with well-known definitions of Nesteruk-Porfyryev contrast and Vorobel contrast are given using transformation coefficients.

The requirements for the metric in the metric space (the axiom of identity, symmetry and triangle inequality) are performed for linear description of contrast. The module of linear contrast in combination with the set (space) of brightness values of image elements forms the Euclidean metric space.

Key words: the contrast, the kernel of contrast, quantitative assessments of contrast, linear transformations of brightness scale.

Вступ

Одним із основних завдань методів попередньої цифрової обробки зображень є покращення їх якості. Якість цифрових зображень характеризується низкою параметрів, до основних з яких належить контраст [1, 2, 3]. Визначаючи контрастність багатоелементних сюжетних зображень,ураховують визначення контрасту для окремих комбінацій його елементів (об'єктів і фону), які називають ядрами контрасту [4]. Одним із основних недоліків відомих визначень ядер контрасту [2, 3, 5] є їх залежність від лінійних перетворень шкали яскравості [2]. Зауважимо, що перетворення зображень здебільшого відбувається з одночасним використанням лінійних і нелінійних перетворень шкали яскравості [6, 7]. Враховуючи, що у разі лінійних перетворень шкали яскравості ентропія зображення і співвідношення величин амплітуди перепадів яскравості на границях елементів зображення не змінюються, а також не змінюються їх відношення до динамічного діапазону (різниці між максимальним і мінімальним значеннями) яскравості, обґрунтованою є вимога щодо забезпечення інваріантності визначення ядра контрасту до лінійних перетворень шкали яскравості. Застосування ядер контрасту, інваріантних до лінійних перетворень, дасть змогу підвищити ефективність формування кількісних оцінок контрасту за нелінійних перетворень шкали яскравості зображень. В зв'язку з цим наукової та практичної значущості набуває задача пошуку визначення контрасту для окремих комбінацій елементів зображення (ядра контрасту), яке інваріантне до лінійних перетворень шкали яскравості, а також задовольняє вимоги асиметричності, рівноправності входження аргументів [5], однозначності й визначеності умов рівності нулю і досягнення екстремальних значень [4]. Саме ці питання і розглянуто нижче.

Порівняльний аналіз визначень оцінок контрасту елементів зображення

Вважається, що контраст – безрозмірна величина, яка характеризує (кількісно або якісно) значущу або помітну відмінність (різницю) характеристик різних ділянок зображення [2, 4]. Більшість визначень контрасту ґрунтується на результатах експериментальних досліджень П. Бугера і Е. Г. Вебера, сформульованих у вигляді закону Бугера–Вебера [8], подальшим розвитком якого є сформульований Г. Т. Фехнером у 1860 р. закон Вебера–Фехнера [9]. Розвиваючи закон Вебера–Фехнера, в 1970 р. В. Ф. Нестерук і Н. Н. Порфир'єва опублікували закон, який встановлює іншу залежність реакції системи сприйняття на зміну збудження зорової системи [5]:

$$C^N(L_i, L_0) = \left(L_i^{2g} - L_0^{2g}\right) / \left(L_i^{2g} + L_0^{2g}\right), \tag{1}$$

де C^N – значення контрасту Нестерука–Порфир'євої; L_i – яскравість i-го елемента зображення; L_0 – рівень адаптації; γ – параметр, що характеризує фізіологічний рівень сприйняття реакції.

Але найширше практичне застосування має визначення порогового контрасту, яке випливає з виразу (1), якщо $\gamma = 0{,}5$ [1, 5, 11]:

$$C^N(L_i,L_j)=(L_i-L_j)/(L_i+L_j) \quad (2)$$

Для $L\in[L_{\min},L_{\max}]$ контраст Нестерука–Порфир'євої $C^N(\cdot)$ набуває значення у діапазоні

$$C^N(L_i,L_j)\in[2L_{\min}/(L_{\max}+L_{\min})-1,1-2L_{\min}/(L_{\max}+L_{\min})],\ \ L_i,L_0\in[L_{\min},L_{\max}] \quad (3)$$

і екстремальні значення контрасту $C^N(\cdot)$ дорівнюють –1 і 1 тільки тоді, коли $L_{min}=0$.

В [4] показано, що коли вирази для визначення контрасту випливають із закону Вебера–Фехнера, то значення можливих контрастів стає необмеженим. Обмеженість зміни контрасту на проміжку [0,1] характерна для закону Нестерука–Порфир'євої. Але при цьому виникає та багатозначність умов, за яких досягається максимальний контраст (рис. 1) [4]. Щоб усунути цю множинність і нерівноправність впливу значень яскравості на контраст та з метою визначення його як безрозмірної величини в [4] запропоновано лінійний опис контрасту, який забезпечує екстремальне його значення тільки тоді, коли одне зі значень яскравості є мінімально можливим, а друге значення максимально допустимим (рис. 2):

$$C^V(L_i,L_j)=(L_i-L_j)/L_{\max}. \quad (4)$$

Максимальний контраст логічно відповідає максимальній відмінності значень L_i і L_j яскравості, а знак контрасту вказує на те, яке зі значень яскравості переважає – L_i чи L_j (рис. 2).

Для зображення з яскравістю $L\in[L_{\min},L_{\max}]$ контраст $C^V(\cdot)$ набуває значення у діапазоні

$$C^V(L_i,L_j)\in[L_{\min}/L_{\max}-1,1-L_{\min}/L_{\max}],\ \ при\ L\in[L_{\min},L_{\max}] \quad (5)$$

З (5), за аналогією з (3), випливає, що екстремальні значення $C^V(\cdot)$ контрасту Воробеля дорівнюють -1 і 1 тоді й тільки тоді, коли $L_{\min}=0$.

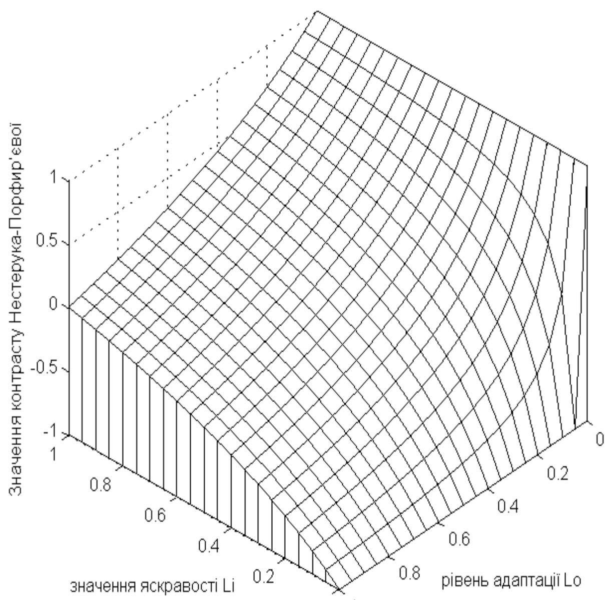

Рис. 1. Залежність контрасту Нестерука–Порфир'євої від зміни значень яскравості i-го елемента та рівня адаптації

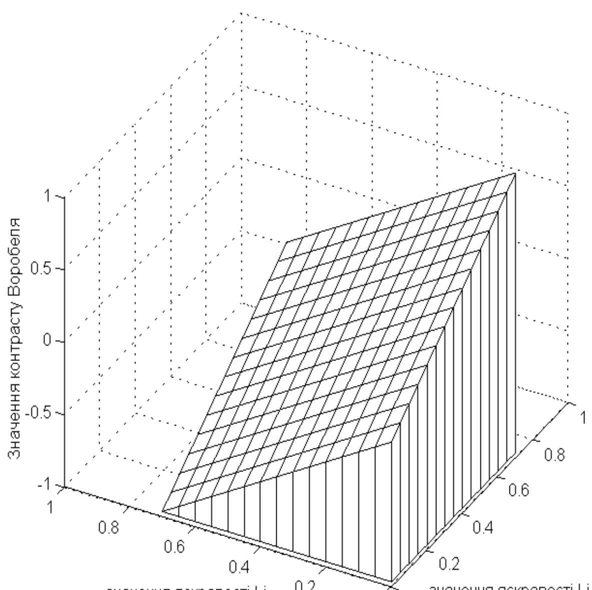

Рис. 2. Залежність контрасту Воробеля для тестового зображення "zelda" від зміни значень яскравості елементів i та j

Вирази (1), (2), (4) називають ядрами для розрахунку узагальненого контрасту зображення або його локальної частини чи окремого об'єкта [4]. Проаналізуємо вплив лінійних перетворень шкали яскравості на величину контрасту тестового зображення, яке представлене на рис. 3 [10], для ядер, описаних виразами (2) і (4). Для цього представимо лінійне перетворення шкали яскравості, для якого функція яскравості така:

$$L' = k \cdot L + b, \tag{6}$$

де L' – яскравість перетвореного зображення; k – коефіцієнт лінійного розтягу ($k \neq 0$); b – величина лінійного зсуву шкали яскравості. Результати аналізу показано на рис. 4.

Підставивши вказане лінійне перетворення (6) яскравості у вирази (2) і (4), отримаємо:

$$C^N\left(L_i', L_0'\right) = \left(1 - b \cdot \left(b + k \cdot \frac{L_i + L_0}{2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{L_i - L_0}{L_i + L_0} = \left(1 - b \cdot \left(b + k \cdot \frac{L_i + L_0}{2}\right)^{-1}\right) \cdot C^N\left(L_i, L_0\right) \tag{7}$$

$$C^V\left(L_i', L_j'\right) = \left(1 - b \cdot \left(b + k \cdot L_{\max}\right)^{-1}\right) \cdot \left(L_i - L_j\right) / L_{\max} = \left(1 - b \cdot \left(b + k \cdot L_{\max}\right)^{-1}\right) \cdot C^V\left(L_i, L_j\right) \tag{8}$$

Згідно з (7)–(8) зміна величини ядер контрасту (2) і (4) за лінійних перетворень залежить від значення співвідношення величин лінійного зсуву і лінійного розтягу шкали яскравості (рис. 5, рис. 6), а також від яскравості порівнювальних елементів для (7) і максимальної яскравості для (8).

У разі лінійних перетворень шкали яскравості тестового зображення “zelda” [10] (рис. 3) при b = 0,1 і k =1 контраст Нестерука–Порфир’євої (2) відповідно до (7) зменшується на 16–30 %, а для b = –0,1 і k =1 збільшується на 15–70 % (рис. 4). Аналогічно для тестового зображення “zelda” контраст Воробеля (4) при b = 0,1 і k =1 зменшується на 12 % і при b = -0,1 і k =1 збільшується на 16 % відповідно (рис. 4).

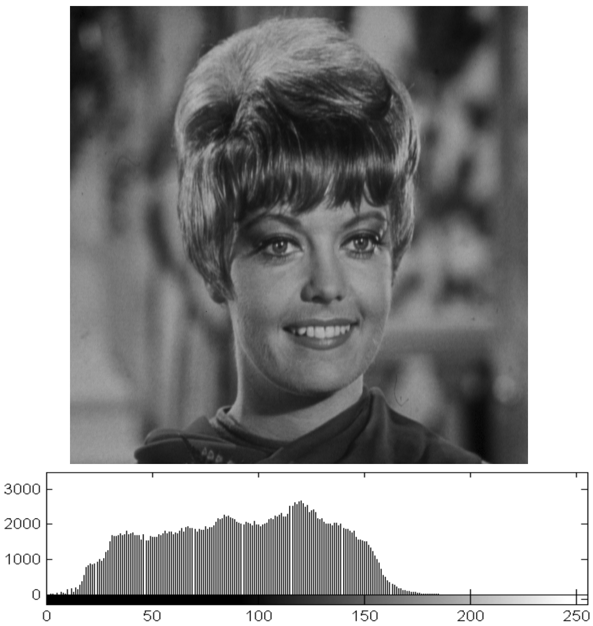

Рис.3. Тестове зображення “zelda” [10] і його гістограма

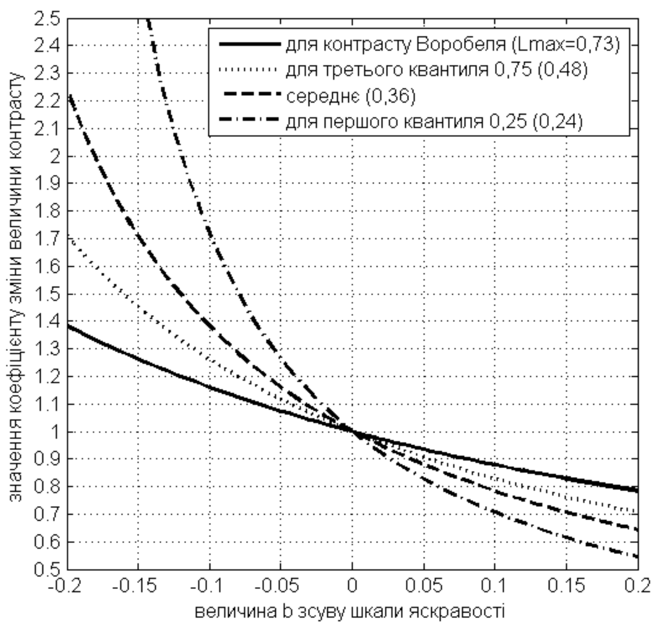

Рис.4. Залежність зміни величини контрасту від лінійного зсуву b (k=1) для зображення “zelda”

Враховуючи, що $\left(L_i + L_0\right) \leq L_{\max}$ з (7) і (8) випливає, що за умови (k/b)>0 контраст Воробеля (рис. 6) є менш чутливим (“стійкішим”) до впливу лінійних перетворень шкали яскравості порівняно з контрастом Нестерука–Порфир’євої (рис. 5), і навпаки, коли (k/b)<0.

Для кількісної оцінки контрасту комбінацій елементів зображення за різних методів перетворень необхідне ядро контрасту, інваріантне до лінійних перетворень шкали яскравості.

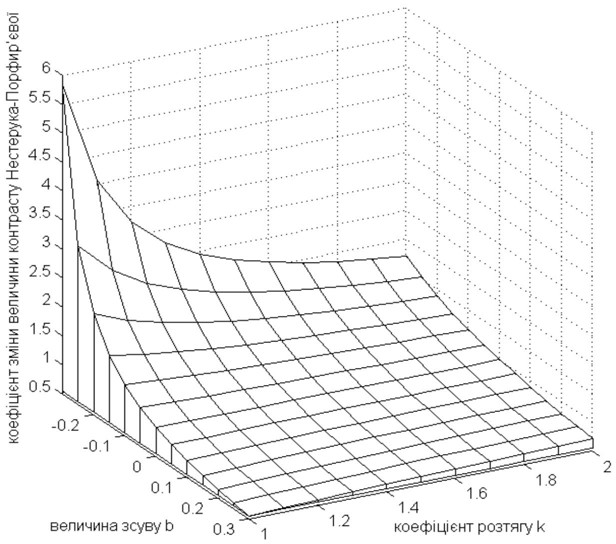

Рис. 5. Значення коефіцієнта зміни величини контрасту Нестерука–Порфир'євої за лінійних перетворень шкали для зображення "zelda"

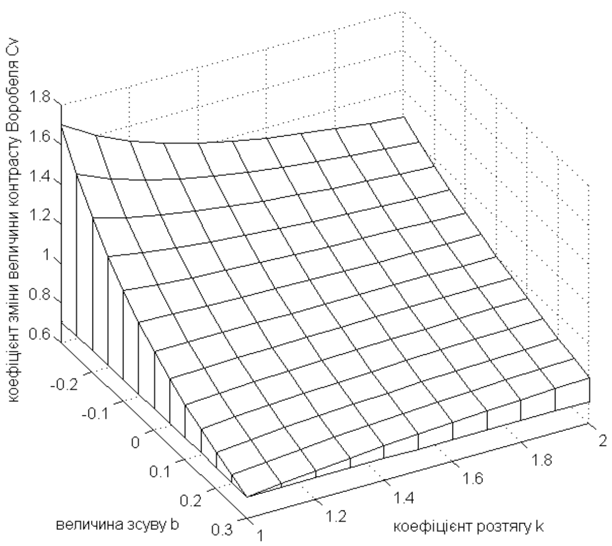

Рис. 6. Значення коефіцієнта зміни величини контрасту Воробеля за лінійних перетворень шкали яскравості для зображення "zelda"

Визначення ядра контрасту, інваріантного до лінійних перетворень шкали яскравості

Контраст $C(L_i, L_i)$ є безрозмірною функцією і згідно з [4] повинен задовольняти вимоги:

– асиметричності й забезпечувати рівноправність входження аргументів L_i і L_j:

$$C(L_i, L_j) = -C(L_j, L_i) \;; \tag{9}$$

– однозначності й визначеності умов, за яких досягається рівність нулю (аксіома тотожності)

$$C(L_i, L_j) = 0, \quad \textit{тоді й тільки тоді, коли } L_i = L_j \;; \tag{10}$$

– досягнення екстремальних значень тільки тоді, коли одне із значень яскравості набуває максимального, а інше – мінімально допустимого значення:

$$\left| C(L_i, L_j) \right| = \begin{cases} C_{\max}, \; \textit{якщо}\,(L_i = L_{\max}) \wedge (L_j = L_{\min})\,\textit{або}\,(L_i = L_{min}) \wedge (L_j = L_{\max}) \\ < C_{\max}, \; \textit{у інших випадках} \end{cases} \tag{11}$$

де $C_{\max} = \max\limits_{L_i, L_j \in [L_{\min}, L\max]} \left| C(L_i, L_j) \right|$ – величина (модуль) екстремальних значень контрасту.

З вимоги щодо обмеження зміни величини контрасту на проміжку [0,1] випливає, що у виразі (11) $C_{max} = 1$. Без обмеження загальності припустимо, що

$$C(L_{\max}, L_{\min}) = 1 \;\wedge\; C(L_{\min}, L_{\max}) = -1 \tag{12}$$

Оскільки під час лінійних перетворень шкали яскравості ентропія зображення не змінюється, не змінюються співвідношення величин амплітуди перепадів яскравості на границях елементів зображення, а також не змінюються їх відношення до динамічного діапазону (різниці між максимальним і мінімальним значеннями) яскравості, інтуїтивно обґрунтованою є вимога щодо забезпечення інваріантності визначення контрасту до лінійних перетворень (6) шкали яскравості

$$C(L_i, L_j) = C(L_i', L_j') \;. \tag{13}$$

З вимоги до рівноправності діапазонів яскравості згідно з [4], інтуїтивно обґрунтованою є також вимога до пропорційності значення контрасту до зміни значення аргументу (яскравості)

$$C(L_i, L_j)/C(L_n, L_m) = (L_i - L_j)/(L_n - L_m), \textit{ для } \forall\, L_n \neq L_m \wedge L_i \neq L_j \tag{14}$$

Виразимо $C(L_i, L_j)$ у вигляді співвідношення лінійних комбінацій значень L_i, L_j яскравості з невідомими постійними значеннями коефіцієнтів $a_n = const,\ n = \overline{1,6}$:

$$C(L_i, L_j) = (a_1 L_i + a_2 L_j + a_3)/(a_4 L_i + a_5 L_j + a_6),\quad \text{де } L_i, L_j \in [L_{\min}, L_{\max}] \tag{15}$$

З (10) випливає, що якщо $L_i = L_j$:

$$C(L_i, L_i) = (a_1 L_i + a_2 L_i + a_3)/(a_4 L_i + a_5 L_i + a_6) = 0 \ \text{для} \ \forall\ L_i = \mathrm{var}, L_i \in [L_{\min}, L_{\max}] \tag{16}$$

З (16), якщо $L_i = 0$, випливає, що $a_3 = 0$, $(a_1 + a_2)L_i = 0\ \forall\ L_i \in [L_{\min}, L_{\max}]$ і, відповідно $a_1 = -a_2$.

Для випадку, коли $a_1 = -a_2 \neq 0$, поділимо чисельник і знаменник на a_1, позначимо $d_1 = a_4 / a_1, d_2 = a_5 / a_1, d_3 = a_6 / a_1$ і зведемо вираз (16) для $C(L_i, L_j)$ до вигляду:

$$C(L_i, L_j) = (L_i - L_j)/(d_1 L_i + d_2 L_j + d_3) \tag{17}$$

Запишемо (12) з урахуванням (17) і прирівнявши, отримаємо рівність $d_1(L_{\max} - L_{\min}) = d_2(L_{\max} - L_{\min})$, з якої випливає, що $d_1 = d_2$. Запишемо $C(L_i, L_j)$ у вигляді

$$C(L_i, L_j) = (L_i - L_j)/(d_1(L_i + L_j) + d_3) \tag{18}$$

Вираз (18) являє собою узагальнений опис контрасту, що задовольняє вимоги асиметричності й рівноправності входження аргументів L_i і L_j (12), а також вимоги щодо однозначності й визначеності умов, за яких досягається рівність нулю (10).

Якщо d_1 =1 і d_3 =0, вираз (18) відповідає контрасту Нестерука–Порфир'євої для γ=0,5 (2), а якщо d_1 =0 і $d_3 = L_{max}$ відповідає контрасту Р. А. Воробеля (4).

Послідовно запишемо (12) з урахуванням (18), виразимо d_3 як функцію від d_1, L_{min}, L_{max}, позначимо d_1 як τ, і підставимо у (18). Тоді отримаємо вираз:

$$C(L_i, L_j) = (L_i - L_j)/(t \cdot [(L_i + L_j) - (L_{\max} + L_{\min})] + (L_{\max} - L_{\min})) \tag{19}$$

Вираз (19) являє собою узагальнений опис для контрасту, що задовольняє вимоги (9)–(12) для визначення контрасту, сформульовані в [4], а також вимогу (13) щодо забезпечення інваріантності визначення контрасту до лінійних перетворень шкали яскравості .

Аналіз показує, що отриманий вираз (19) забезпечує виконання вимоги (14) до пропорційності значень контрасту приросту аргументів тоді й тільки тоді, коли $\tau = 0$.

Якщо $\tau = 0$, з виразу (19) отримаємо таке визначення лінійного опису контрасту:

$$C^E(L_i, L_j) = (L_i - L_j)/(L_{\max} - L_{\min}) \tag{20}$$

Вираз (20) – це опис лінійного контрасту, що задовольняє вимоги (9)–(13), сформульовані в [4], і вимогу (17) щодо стійкості до лінійних перетворень шкали яскравості, а також вимогу (14) щодо пропорційності значення контрасту до приросту значень аргументів.

Аналізуючи лінійний опис контрасту (20), зазначимо, що він задовольняє вимоги до метрики у метричному просторі, бо для нього виконуються аксіоми:

а) тотожності $\left|C^E(L_i, L_j)\right| = 0$, *тоді і тільки тоді, коли* $L_i = L_j$;

б) симетрії $\left|C^E(L_i, L_j)\right| = \left|C^E(L_i, L_j)\right|$;

в) нерівності трикутника $\left|C^E(L_i, L_j)\right| \leq \left|C^E(L_i, L_m)\right| + \left|C^E(L_m, L_j)\right|$.

і відповідно до теорії контрастності зображень Р. А. Воробеля, згідно з [4], модуль лінійного контрасту (20) у сукупності з множиною L значень яскравості елементів зображення утворює метричний евклідовий простір.

Висновки

1. Величина значень ядер контрасту згідно з виразами Нестерука–Порфир'євої та їх модифікацій змінюється у разі лінійних перетворень шкали яскравості та залежить від параметрів перетворень (коефіцієнта підсилення та величини зсуву шкали яскравості).

2. Запропоновані узагальнений і лінійний описи ядер контрасту, на значення яких не впливають лінійні перетворення шкали яскравості зображення і які задовольняють вимоги асиметричності, рівноправності входження аргументів, однозначності й визначеності умов, за яких досягається рівність нулю і екстремальні значення контрасту. Запропонований лінійний опис контрасту задовольняє вимогу стосовно пропорційності значення контрасту до приросту значень аргументів.

1. Монич Ю. И., Старовойтов В. В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386. 2. Eli Peli, Contrast in complex images (1990) // J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 7, No.6. 3. Ваврук Є., Грицик І. Вибір методу підвищення візуальної якості зображень // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2008. – № 630 : Комп'ютерні системи та мережі. – С. 36–42. 4. Воробель Р. А. Цифрова обробка зображень на основі теорії контрастності: дис. … д-ра техн. наук. / Р. А. Воробель. – Львів. 1999. – 369 с. 5. Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. Контрастный закон восприятия света // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. XXIX, вып. 6. – С. 1138–1143. 6. Gordon R. and Rangaraj M. Rangayyan. Feature enhancement of film mammograms using fixed and adaptive neighborhoods // Applied Optics / Vol. 23, No. 4 / 15 February 1984. 7. Rizzi A., Algeri T., Medeghini G., and Marini D. A proposal for contrast measure in digital images // CGIV 2004 - Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision, 2004. 8. Ernst Heinrich Weber, De Tactu [Concerning Touch] (1834), reprinted in The Sense of Touch, trans. H. E. Ross, New York: Academic Press, 1978. 9. Gustav Theodor Fechner. Elemente der Psychophysik, 2 Bände, Leipzig, 1860. 10. Public-Domain Test Images for Homework's and Projects, http://homepages.cae.wisc.edu/~ece533/ /images/zelda.png.