7. *Hsin-Chia Lu and Tah-Hsiung Chu.* Microwave Diversity Imaging Using Six-Port Reflectometer.// IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Jun. 1999, vol.47. N 1.- p.84-87.

УДК 681.325.5

ВИЗНАЧЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО КОНТРАСТУ ФУНКЦІОНАЛЬНО ПЕРЕТВОРЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЛІНІЙНОМУ ОПИСІ КОНТРАСТУ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

© Роман Воробель

Фізико-механічний інститут НАН України

Проведено аналіз відомого підходу до визначення узагальненого контрасту зображень. Встановлено його недоліки. Запропоновано визначення узагальненого контрасту зображення на основі лінійного опису контрасту елементів. Показано, що він не залежить від контрасту вхідного зображення, його сюжету та гістограми, а є характеристикою перетворення.

The analysis of know approaches to defining general contrast of images is carried out. Drawbacks of this methods are shown. The method for computing general contrast of image based on linear description of elements is proposed. It is shown that general contrast is characteristic of transformation and does not depend on input image contrast, its content and his histogram.

Вступ

Перетворення зображення зі зміною його візуальної якості часто застосовують в медицині, цифрових телевізійних і мультимедійних системах. Воно залежить від мети використання обробленого зображення, яка може бути різною, а саме: забезпечення оптимальності зорового сприйняття, отримання наперед заданої гістограми яскравостей, представлення деталей зображення в повному динамічному діапазоні, виділення еквіденситних полів та ін. Однак для об'єктивної кількісної оцінки отриманого зображення бажано знати його характеристики і їх властивості. Однією з важливих характеристик зображення є узагальнений контраст, який безпосередньо пов'язаний із способом визначення контрасту елементів зображення. В роботі [1] описаний підхід до визначення узагальненого контрасту. Однак він базується на описі контрасту двох сусідніх елементів з яскравостями L_i та L_j у вигляді

$$K = (L_i - L_j) / (L_i + L_j). \qquad (1)$$

Недоліком цього підходу є невідповідність виразу (1) означенню контрасту як кількісної міри через його багатозначність і завищені значення при низьких яскравостях елементів. Для усунення цього недоліку у роботах [2, 3] було запропоновано лінійний опис контрасту двох сусідніх елементів виду

$$C = (L_i - L_j) / LMAX\,, \qquad (2)$$

де $LMAX$ – максимально можлива яскравість елемента зображення. Це зумовило необхідність визначення узагальненого контрасту перетворених функціонально зображень при лінійному описі контрасту його елементів. Для цього спочатку розглянемо відомий підхід [1] до визначення узагальненого контрасту , а потім застосуємо його до випадку лінійного опису контрасту елементів зображення (2).

1. Визначення узагальненого контрасту зображення на основі опису (1) контрасту його елементів.

Загальний алгоритм обробки зображення за допомогою оператора $F(L) = L^*$ включає ряд послідовних лінійних і нелінійних ланок [1]). Фактично довільну нелінійну операцію завжди супроводжує лінійна через скінченність зчитуючих апертур, дефокусування та ін. Тому в роботі [1] зазначена доцільність розділеного вивчення лінійної та нелінійної обробки, бо, крім того, лінійна обробка може бути реалізована самостійно, без нелінійних елементів. Оператор лінійного перетворення можна представити у вигляді згортки, що перетворює зображення за алгоритмом

$$L^*_{i,j} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} h(k-i, l-j) L_{i,j}.$$

При цьому множина функцій розсіювання точки чи імпульсних функцій h (ядра оператора) безмежна. Тому клас лінійних перетворень містить нескінченну кількість варіантів реалізації за видом ядра і за значенням його параметрів. Що ж до нелінійних перетворень зображень, в загальному випадку вони можуть здійснюватися на основі теорії статистичних рішень, для чого необхідні багатомірні функції

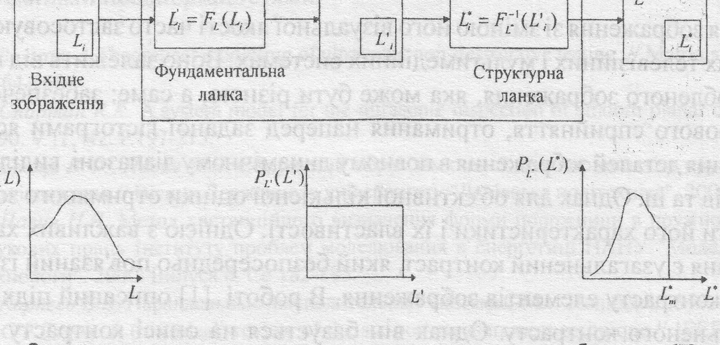

Схема структури статистичного оператора перетворення зображення [7] розподілу всіх елементів зображення, які, здебільше, невідомі. Тому переважна більшість нелінійних алгоритмів отримували емпірично і при оцінці їх ефективності до розрахунку приймалася тільки суб'єктивна оцінка якості зображення. В той же час значних результатів у побудові методів статистичних нелінійних перетворень досягли М.М. Мирошников, В.Ф. Нестерук, Н.Н. Порфир'єва та їхня школа у ВНЦ "Державний оптичний інститут ім. С. І. Вавілова" [4 - 6] завдяки отриманню кількісної оцінки їх ефективності за значенням контрасту.

Типовий підхід до структури побудови статистичних перетворень зображень викладений у роботі [7]. Тут розглядається обробка вхідного зображення L, яка описується деяким оператором $F(L) = L^*$, де L^* – перетворене зображення. Перетворення завжди здійснюється для досягнення однієї чи декількох певних цілей, зокрема для покращання якості зображення за одним чи групою параметрів. За аналогією з [7] розглянемо загальне нелінійне перетворення зображення L, що задане у вигляді матриці $\|L\|$. Матричний опис враховує дискретизацію при цифровій обробці. Нехай $F(\cdot)$ – оператор перетворення. Нове зображення формується з матрицею

$$\|L^*\| = F(\|L\|). \tag{3}$$

Вираз (3) – це загальна форма перетворення. На практиці часто потрібно виділяти конкретні підкласи перетворень, більше деталізовувати їх.

Найпростішим класом, згідно з викладеним у роботі [7], є стаціонарні безінерційні перетворення, тобто такі, при яких довільний елемент перетвореного зображення L_i^* формується за певним законом, що не залежить від індексу й елемента вхідного зображення L:

$$L_i^* = \varphi(L_i),\ i \in [1, N \cdot M]. \tag{4}$$

тут $\varphi(\cdot)$ – вже просто одномірна функція (оператор перетворення). Як видно, у цьому випадку здійснюється перетворення величин елементів (тонорозподілу) за принципом "точка в точку". Функція $\varphi(\cdot)$ фактично може абсолютно не залежати від властивостей вхідного і перетвореного зображень. У цьому випадку вибирати $\varphi(\cdot)$ слід перебираючи багатьох функцій для досягнення бажаного ефекту. Очевидно, що такий шлях може бути вибраний для оброблення певних унікальних зображень і не може бути використаним при широкому їх класі.

Перетворення має відображати властивості зображень L і L^*. Тільки тоді можна свідомо домогтися бажаного результату. Насамперед використовуються прості характеристики вхідного зображення – їх одномірні функції розподілу яскравостей $P_L(L_i)$ або густини розподілу $p_L(L_i)$.

Якщо $P_L(L_i)$ чи $p_L(L_i)$ – це єдина характеристика зображення, що використовується, то природним є характеризувати перетворене зображення L^* також за таким підходом, тобто аналогічними функцією $P_{L^*}(L_i^*)$ і $p_{L^*}(L_i^*)$. Поставимо вимогу, щоб оператор (4) здійснював перетворення тонорозподілу, який заданий функцією $P_L(L_i)$, в бажаний розподіл $P_{L^*}(L_i^*)$.

Функції $P_L(L_i)$ і $P_{L^*}(L_i^*)$ – монотонні і набувають значень в одному і тому самому інтервалі [0,1]. Тому очевидним є те, що знайдеться пара значень L і L^* таких, що буде виконуватися рівність

$$P_{L^*}(L_i^*) = P_L(L_i). \tag{5}$$

Звідси знаходять вираз для оператора безінерційного перетворення, яке називається статистичним,

$$L_i^* = P_{L^*}^{-1}[P_L(L_i)], \tag{6}$$

де $P_{L^*}^{-1}$ – обернена до P_{L^*} функція. Аналіз перетворення (6) показує [7], що воно містить дві чітко виділені нелінійні ланки:

1. Спочатку кожному елементу L_i вхідного зображення L ставиться у відповідність величина $L_i' = P_L(L_i)$, значення якої лежать в інтервалі [0,1], тобто в обмеженому динамічному діапазоні. При цьому слід зазначити, що теоретичні значення L_i належать нескінченному інтервалу [0, ∞]. Отже, перша ланка є компресуючою, і L як випадкова величина буде розподілена рівномірно. У цьому сенсі перша ланка незмінна при довільному зображенні L.
2. Далі кожному L_i ставиться у відповідність величина $L_i^* = P_{L^*}^{-1}(L_i)$, що в загальному випадку набуває числових значень в інтервалі [0, ∞]. Структура цієї ланки може змінюватися залежно від вимог, що накладаються на деякі властивості перетвореного зображення. Це можуть бути вимоги обмеженого динамічного діапазону значень L^*. Тому другу ланку називають структурною.

Наявність компресуючої ланки, що перетворює довільний вхідний розподіл у рівномірний, надає цьому перетворенню самостійного значення. Оскільки воно присутнє також і у довільному статистичному перетворенні, то йому, загалом, надають фундаментального значення. Саме в цьому розумінні його виділяють серед інших.

Перша ланка стає зайвою тільки у випадку, коли розподіл вхідного зображення рівномірний. Відносно до неї друга ланка дає ізоморфне перетворення, тобто зберігає рівномірність розподілу.

Зазначимо, що аргументом другої ланки будуть значення функції P_L, що відіграють роль аргументу для функції $F_{L^*}^{-1}(\cdot)$. В загальному розширюють клас статистичних перетворень через опис дії другої ланки деякою однозначною функцією ψ(·), що задана на інтервалі [0,1] і набуває значень в інтервалі [0, ∞], тобто формує зображення L^* оператором

$$L_i^* = y[P_L(L_i)]. \tag{7}$$

Оператор виду (7) називають неповним статистичним перетворенням. Підкласи неповних статистичних перетворень будують, виходячи з різних міркувань.

У роботі [8] встановлено основну фундаментальну властивість всього класу повних та неповних статистичних перетворень, яка випливає з визначення контрасту елементів за виразом (1) та узагальненого контрасту зображення

$$K_{ii0} = (L_i^{2\gamma} - \overline{L}^{2\gamma}) / (L_i^{2\gamma} + \overline{L}^{2\gamma}), \tag{8}$$

де L_i – яскравість елемента перетвореного зображення, $\overline{L}$ – рівень адаптації зорового механізму за яскравістю, γ – параметр, що характеризує систему сприйняття (приймають γ = 1). Уточнимо її. Для цього припустимо, що в результаті згаданих вище перетворень отримано зображення L^*. Як і кожне сюжетне зображення, його можна охарактеризувати значенням контрасту, що випливає з формул (1) і (8):

$$K_{gen} = \int_0^{\infty} \left| \frac{\left(L_i^*\right)^2 - M^2\left[L_i^*\right]}{\left(L_i^*\right)^2 + M^2\left[L_i^*\right]} \right| \cdot p_{L^*}\left(L_i^*\right) dL_i^* ,$$

або

$$K_{gen} = \int_0^{\infty} \left| \frac{\varphi^2\left(L_i\right) - M^2[\varphi]}{\varphi^2\left(L_i\right) + M^2[\varphi]} \right| \cdot p_{L^*}\left(L_i^*\right) dL_i^* . \tag{9}$$

Якщо розглядати цей вираз для класу статистичних перетворень і зауважити, що $p_{L^*}(L_i^*)dL_i^* = dP_{L^*}(L_i^*) = dP_L(L_i)$, де $P_L(L_i)$ – функція розподілу вхідного зображення, то він може бути записаний у формі інтеграла Стільт'єса

$$K_{gen} = \int_0^{1} \left| \frac{\left[P_{L^*}^{-1}(P_L)\right]^2 - M^2\left[L_i^*\right]}{\left[P_{L^*}^{-1}(P_L)\right]^2 + M^2\left[L_i^*\right]} \right| \cdot dP_L . \tag{10}$$

Структура виразу (10) така, що P_L відіграє тут роль незалежної змінної в означеному інтегралі і, отже, він не залежить від його вигляду.

Можемо переписати (10) як

$$K_{gen} = \int_0^{1} \left| \frac{\left[P_{L^*}^{-1}(z)\right]^2 - M^2\left[L_i^*\right]}{\left[P_{L^*}^{-1}(z)\right]^2 + M^2\left[L_i^*\right]} \right| \cdot dz . \tag{11}$$

Це все означає, що величина K_{gen} не залежить від контрасту, гістограми та сюжету вхідного зображення, але є характеристикою конкретного структурного статистичного перетворення, що визначається функцією P_{L^*} і може бути мірою його ефективності.

Аналогічно для всього класу нелінійних статистичних перетворень отримуємо

$$K_{gen} = \int_0^{1} \left| \frac{\psi^2(z) - M^2\left[L_i^*\right]}{\psi^2(z) + M^2\left[L_i^*\right]} \right| \cdot dz . \tag{12}$$

З виразу (12) є очевидним, що для кожного структурного перетворення значення контрасту може бути розраховане завчасно.

Згідно з викладеним вище структурна схема статистичного оператора перетворення відповідає зображеній на рисунку.

Однак вираз (12) отриманий, виходячи з визначення контрасту елементів зображення за формулою (1). Логічно припустити, що і у випадку визначення контрасту елементів за виразом (2) аналогічний вираз для неповного контрасту зображення після його функціонального перетворення не залежним від контрасту вхідного зображення, його гістограми та сюжету. Перевіримо це припущення.

2. Визначення узагальненого контрасту зображення на основі опису (2) контрасту його елементів

У роботі [9] встановлено вираз для обчислення узагальненого контрасту зображення при лінійному описі контрасту його елементів у вигляді

$$C_{gen} = \frac{1}{2LMAX}\int_0^\infty \left\| 2(L-\overline{L}) + LMAX - \left| 2(L-\overline{L}) - LMAX \right\| \right\| \cdot p_L(L)dL \,. \qquad (13)$$

Перепишемо його за аналогією з (9) як [10]:

$$C_{gen} = \frac{1}{2LMAX}\int_0^\infty \left\| 2\{\varphi(L_{i,j}) - M[\varphi]\} + LMAX - \left| 2\{\varphi(L_{i,j}) - M[\varphi]\} - LMAX \right\| \right\| \cdot p_{L^*}(L_i^*)dL_i^* \qquad (14)$$

або ж, якщо розглядати цей вираз для класичних статистичних перетворень і зазначити, що $p_{L^*}(L_i^*)dL_i^* = dP_{L^*}(L_i^*) = dP_L(L_i)$, то він також може бути записаний у формі інтеграла Стільт'єса

$$C_{gen} = \frac{1}{2LMAX}\int_0^1 \left\| 2\{P_{L^*}^{-1}(P_L) - M[L^*]\} + LMAX - \left| 2\{P_{L^*}^{-1}(P_L) - M[L^*]\} - LMAX \right\| \right\| \cdot dP_L \,. \qquad (15)$$

Через те, що структура виразу (15) така, що P_L відіграє роль незалежної змінної в означеному інтегралі, він не залежить від його вигляду. Тому можемо переписати (15) як

$$C_{gen} = \frac{1}{2LMAX}\int_0^1 \left\| 2\{P_{L^*}^{-1}(z) - M[L^*]\} + LMAX - \left| 2\{P_{L^*}^{-1}(z) - M[L^*]\} - LMAX \right\| \right\| \cdot dz \,. \qquad (16)$$

Аналіз виразу (16) показує, що величина C_{gen} не залежить від контрасту, гістограми та сюжету вхідного зображення і є характеристикою конкретного структурного статистичного перетворення, що визначається функцією P_{L^*}, і тому може бути мірою його ефективності. Узагальнений вираз обчислення контрасту для всього класу нелінійних статистичних перетворень буде таким:

$$C_{gen} = \frac{1}{2LMAX}\int_0^1 \left\| 2\{\psi(z) - M[L^*]\} + LMAX - \left| 2\{\psi(z) - M[L^*]\} - LMAX \right\| \right\| \cdot dz \,, \qquad (17)$$

де $\psi(z) = P_{L^*}^{-1}(z)$.

Однак вираз (17) незручний для отримання розв'язку в аналітичному вигляді. Тому використаємо представлення зображень з використанням еквіденситних полів і описів відповідної їм суми двох контрастів [9] як

$$C_{ij0} = \begin{cases} k(L_i - 2\overline{L} + L_j) & \text{при } \left| L_i - 2\overline{L} + L_j \right| \le LMAX, \\ 1 & \text{при } \left| L_i - 2\overline{L} + L_j \right| > LMAX, \end{cases} \qquad (18)$$

де $k = 1/LMAX$, або ж

$$C_{ij0} = 0{,}5 \cdot k(L_i - 2\bar{L} + L_j + LMAX - |L_i - 2\bar{L} + L_j - LMAX|). \quad (19)$$

Оскільки для еквіденситних полів $L_i = L_j = L$, то з (18) отримуємо

$$C_{iio} = \begin{cases} \dfrac{2(L-\bar{L})}{LMAX} \text{ при } 2|L - \bar{L}| \le LMAX, \\ 1 \quad \text{при} \quad 2|L - \bar{L}| > LMAX, \end{cases} \quad (20)$$

а з (19) –

$$C_{iio} = \frac{1}{2LMAX}\left[2(L-\bar{L}) + LMAX - |2(L-\bar{L}) - LMAX|\right].$$

Тоді, за аналогією з (14) - (17), з (18) отримаємо

$$C_{gen} = C_{gen}^{(1)} + C_{gen}^{(2)}, \quad (21)$$

де

$$C_{gen}^{(1)} = \begin{cases} \dfrac{2}{LMAX}\displaystyle\int_0^1 |\varphi(L) - M[\varphi]| p_L(L)dL \quad \text{при} \quad \varphi(L) - M[\varphi] > LMAX/2, \\ 0 \qquad \text{при}\, \varphi(L) - M[\varphi] \le LMAX/2, \end{cases}$$

$$C_{gen}^{(2)} = \begin{cases} \displaystyle\int_0^1 p_L(L)dL \;\text{ при}\, \varphi(L) - M[\varphi] > LMAX/2, \\ 0 \quad \text{при} \quad \varphi(L) - M[\varphi] \le LMAX/2. \end{cases}$$

Розглядаючи компоненти $C_{gen}^{(1)}$ і $C_{gen}^{(2)}$ виразу (21) як основу статистичних перетворень і зазначивши, що $p_L(L_{i,j}) = dP_L$, можемо записати його з використанням форми інтеграла Стільт'єса

$$C_{gen}^{(1)} = \begin{cases} \dfrac{2}{LMAX}\displaystyle\int_0^1 \left|P_{L^*}^{-1}[P_L] - M[L^*]\right| dP_L \;\text{ при }\; P_{L^*}^{-1}[P_L] - M[L^*] \le LMAX/2, \\ 0 \qquad \text{при} \quad P_{L^*}^{-1}[P_L] - M[L^*] > LMAX/2. \end{cases}$$

$$C_{gen}^{(2)} = \begin{cases} \displaystyle\int_0^1 p_L(L_{i,j})dL_{i,j} \;\text{ при }\; P_{L^*}^{-1}[P_L] - M[L^*] > L\max/2, \\ 0 \qquad \text{при} \quad P_{L^*}^{-1}[P_L] - M[L^*] \le L\max/2. \end{cases}$$

Структура компонент $C_{gen}^{(1)}$ і $C_{gen}^{(2)}$ така, що P_L відіграє роль незалежної змінної в означеному інтегралі і тому від його вигляду не залежить. Тоді можемо переписати вирази для цих компонент так:

$$C_{gen}^{(1)} = \begin{cases} \dfrac{2}{LMAX} \int_0^1 \left|\psi(z) - M\left[L^*\right]\right| dz & \text{при} \quad \psi(z) - M\left[L^*\right] \le LMAX/2, \\ 0 & \text{при} \quad \psi(z) - M\left[L^*\right] > LMAX/2, \end{cases} \tag{22}$$

$$C_{gen}^{(1)} = \begin{cases} 1 \text{ при } \psi(z) - M\left[L^*\right] > LMAX/2, \\ 0 \text{ при } \psi(z) - M\left[L^*\right] \le LMAX/2. \end{cases} \tag{23}$$

Аналіз компонент (22) і (23) виразу (21) показує, що C_{gen} не залежить від контрасту, гістограми та сюжету вхідного зображення і є характеристикою конкретного структурного статистичного перетворення, що визначається функцією P_{L^*}, і тому може бути мірою його ефективності. В такому випадку для кожного заданого перетворення значення контрасту може бути обчислене завчасно.

Висновки

Встановлено спосіб обчислення узагальненого контрасту функціонально перетвореного зображення при лінійному описі контрасту його елементів. Аналіз отриманих при цьому аналітичних виразів підтвердив припущення про те, що узагальнений контраст (21) є притаманною даному функціональному перетворенню характеристикою. Він не залежить від контрасту, гістограми та сюжету вхідного напівтонового зображення. Ця властивість узагальненого контрасту відкриває можливості до синтезу перетворень, які можуть забезпечувати формування зображень з наперед заданим контрастом.

1. *Нестерук В.Ф., Соколова В.А.* Вопросы теории восприятия сюжетных изображений и количественной оценки их контраста // Оптико-механическая промышленность. 1980. N 5. С. 11-13.

2. *Воробель Р.А.* Лінійний опис визначення контрастності елементів зображення // Доповіді НАН України. - 1998. N 1 С. 127-131.

3. *Воробель Р.А.* Ядра визначення контрасту елементів зображення // Відбір і обробка інформ. 1997. Вип. 11(87). С. 96-100.

4. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983.

5. *Мирошников М.М.* Основные этапы и результаты научных исследований в Государственном оптическом институте: Доклад на Чтениях имени академика Д.С. Рождественского, посвященных 75-летию со дня основания ГОИ // Оптический журнал. 1994. N 4. С. 3-110.

6. *Нестерук В.Ф.* Вопросы построения нелинейных статистических алгоритмов обработки изображений // Оптический журнал. 1992. N 12. С. 52 - 64.

7. *Нестерук В.Ф.* Структура статистических преобразований изображений в ограниченном диапазоне // Труды ГОИ им. С.И. Вавилова. 1982. Т.51. Вып.185. С. 13-22.

8. *Нестерук В.Ф.* Преобразование оптических изображений и оценка их качества / Успехи научной фотографии. М.: Наука, 1985. Т. 23. С. 93-102..

9. *Воробель Р.А.* Сприйняття сюжетних зображень та кількісна оцінка їх контрасту на основі лінійного опису визначення контрастності елементів // Доповіді НАН України. 1998. N 9. С. 103-108.

10. *Воробель Р.А.* Цифрова обробка зображень на основі теорії контрастності. Автореф. дис. д.т.н. Львів: ДНДІ ІІ. - 1999.