

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt187.01.030>

УДК 004.921

С.В. БАЛОВСЯК, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

e-mail: s.balovsyak@chnu.edu.ua

Х.С. ОДАЙСЬКА, аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж,
e-mail: k.odaiska@chnu.edu.ua

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці, Україна

АВТОМАТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГАУСОВОГО ШУМУ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ МЕТОДОМ ВИДІЛЕНИХ ОБЛАСТЕЙ

Розроблено метод автоматичного визначення рівня шуму на цифрових зображеннях, а саме середнього квадратичного відхилення гаусового шуму. Рівень шуму обчислюється за середнім квадратичним відхиленням гистограми для виділеної області зображення, на якій наявний, в основному, шум. Запропонований метод програмно реалізовано в системі MATLAB. Оброблення тестових зображень з використанням запропонованого методу дало змогу отримати меншу похибку обчислення рівня шуму ніж іншими сучасними методами.

Ключові слова: цифрове оброблення зображень, визначення рівня шуму, середнє квадратичне відхилення гаусового шуму, гистограма зображення.

ВСТУП

На експериментальних цифрових зображеннях у більшості випадків є шум, який виникає не тільки при отриманні зображень з сенсорів, але й при їх стисненні з втратами. Рівень шуму є важливим параметром для поширених прикладних задач цифрового оброблення зображень: видалення шуму, сегментації, розпізнавання тощо. Багато сучасних алгоритмів цифрового оброблення зображень передбачають, що параметри шуму відомі, при цьому ефективність таких алгоритмів залежить від точності визначення рівня шуму. Проте при обробленні експериментальних зображень рівень шуму в більшості випадків невідомий, тому розроблення методу точного і автоматичного визначення рівня шуму на зображеннях є актуальним та важливим для практики завданням.

Найбільш поширеною моделлю шуму є адитивний білий гаусовий шум (Additive White Gaussian Noise — AWGN), оскільки багато шумів реальних зображень досить точно описуються моделлю AWGN [1, 2]. З цієї причини в

С.В. БАЛОВСЯК, Х.С. ОДАЙСЬКА, 2017

роботі будемо розглядати способи визначення рівня шуму на зображеннях в моделі AWGN, а такий шум далі будемо спрощено називати гаусовим шумом (або нормальним шумом). Гаусовий шум особливо помітний на зображеннях, отриманих при низькій освітленості. Рівень гаусового шуму (Noise Level) виражається середнім квадратичним відхиленням (СКВ) шуму σ_N .

Використовують декілька основних методів оцінювання рівня шуму на зображеннях:

1. Метод аналізу гістограм розподілу інтенсивності (яскравості) для виділеної області зображення, на якій в основному наявний шум. При цьому виділена область називається також областю інтересу (Region Of Interest — ROI) [3]. Рівень гаусового шуму визначається через СКВ гістограми області ROI. Перевагою методу є його простота, проте висока точність обчислення рівня шуму забезпечується тільки тоді, коли у виділеній області зображення СКВ шуму значно перевищує СКВ корисного сигналу.

2. Засновані на фільтрації методи (filter-based approaches or smoothing-based methods) [4–5], в яких зображення з шумом обробляється високочастотними та низькочастотними фільтрами. Рівень шуму обчислюється на основі фільтрованого зображення. Головна проблема цих методів в тому, що результат фільтрації залежить не тільки від шуму, але й від корисного сигналу, особливо для зображень з чіткими контурами і яскраво вираженими текстурами [6].

3. Кускові або блокові методи (patch-based approaches or block-based methods) [7], в яких на зображеннях виділяється множина однорідних блоків (областей). В межах блоків зміна яскравості зображення спричинюється в основному шумом, а рівень шуму обчислюється, наприклад, за методом головних компонент (principal component analysis — PCA). Недоліком блокових методів є залежність обчисленого рівня шуму від корисного сигналу.

4. Статистичні методи (statistical approaches) [7], засновані на фільтрації зображень і аналізі значення ексцесу для розподілу інтенсивності зображення залежно від рівня шуму. Точність методів значно залежить від частотного спектру конкретного зображення.

5. Методи, засновані на аналізі Фур'є спектрів, які враховують різницю між спектрами корисного сигналу і шуму [3]. Точність таких методів значно знижується при обробленні зображень, для яких спектри корисного сигналу і шуму подібні.

6. Методи, засновані на використанні вейвлетних перетворень (Wavelet transform) [5], які передбачають аналіз вейвлетних коефіцієнтів із певним порогом. Однією з проблем таких методів є оптимальний вибір значення порогу.

Розглянуті методи визначення рівня шуму можуть застосовуватися як до всього зображення, так і до його виділеної області ROI, на якій є в основному шум. У випадку аналізу тільки області ROI, порівняно з аналізом всього зображення, точність обчислення рівня шуму збільшується в кілька разів [4]. Особливо перспективними є автоматичні методи виділення областей ROI. Кожен з перерахованих методів має певні обмеження і недоліки, що стимулює розроблення нових методів оцінювання рівня шуму на зображеннях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Теоретичне значення рівня гаусового шуму відоме тільки для тестових зображень, шум на яких створено програмно. Вважається, що рівень шуму є однаковим для всього зображення. Оскільки коректне виділення області ROI є передумовою точного обчислення рівня шуму на зображенні, тому задача роботи передбачає розробку автоматичного і точного методу виділення області ROI. В основу методу виділення області ROI потрібно покласти низькочастотну фільтрацію зображення з ядром фільтра Гауса, оскільки в результаті такої фільтрації інтенсивність гаусового шуму зменшується більше, ніж інтенсивність корисного сигналу. Виділені області повинні містити в основному шум, тому для обчислення СКВ шуму σ_{NE} доцільно використати метод аналізу гістограм для розподілу інтенсивності в областях ROI, який в такому випадку забезпечує високу точність обчислення рівня шуму при відносній простоті його програмної реалізації. Таким чином, для початкового зображення f_n потрібно виділити область ROI, на якій присутній в основному шум, для цієї області обчислити гістограму $h(z)$ розподілу яскравості z зображення, а в якості оцінки експериментального рівня шуму σ_{NE} використати СКВ σ_h гістограми $h(z)$.

Мета — розроблення методу автоматичного визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях, який використовує виділення області зображення на основі його низькочастотної фільтрації та виконує обчислення рівня шуму методом аналізу гістограми виділеної області, в програмній реалізації розробленого методу в системі MATLAB та в перевірці його точності на прикладі оброблення бази тестових зображень.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З ГАУСОВИМ ШУМОМ

Теоретичне значення СКВ гаусового шуму, яке є однаковим для всіх пікселів початкового зображення f_n , позначимо σ_N . В результаті низькочастотної фільтрації зображення f_n з ядром фільтра Гауса отримується згладжене зображення g_c , для всіх пікселів якого СКВ шуму дорівнює σ_{NC} . Знаючи СКВ σ_w та розміри ядра фільтра Гауса, можливо встановити зв'язок між параметрами гаусового шуму σ_{NC} та σ_N і на основі такого зв'язку виділити області зображення f_n , на яких переважає гаусовий шум.

Густина розподілу ймовірності для гаусового шуму описується формулою [1]

$$p_{DF}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp\left(-\frac{(z - z_C)^2}{2\sigma_N^2}\right), \quad (1)$$

де z — інтенсивність зображення, z_C — математичне сподівання розподілу, σ_N — СКВ шуму, яке у випадку AWGN є рівнем шуму. Квадрат СКВ шуму називається дисперсією $D_N = \sigma_N^2$.

Інтенсивність (яскравість) зображення з шумом (у відтінках сірого) за-

писується в прямокутну матрицю $f_n = (f_n(i, k))$, де $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$, M — висота зображення (в пікселях), N — ширина зображення [3]. Інтенсивність зображення f_n нормується в діапазоні від 0 до 1.

Просторова фільтрація [1] полягає у згортці зображення $f_n = (f_n(i, k))$ з ядром (вікном) фільтра $w = (w(m, n))$ розміром $M_w \times N_w$ елементів за формулою

$$g_c(i, k) = \sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} f_n(i - m + m_c, k - n + n_c) \cdot w(m, n), \quad (2)$$

де $g_c = (g_c(i, k))$ — фільтроване зображення (такого ж розміру, що й f_n); $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$; $M_w = 2 \cdot M_{w2} + 1$ — висота ядра фільтра; $N_w = 2 \cdot N_{w2} + 1$ — ширина ядра фільтра; M_{w2} , N_{w2} — цілі частини від половини розмірів ядра фільтра, $m_c = (M_{w2} + 1)$ — центр ядра фільтра за висотою; $n_c = (N_{w2} + 1)$ — центр ядра фільтра за шириною.

Сума елементів ядра w дорівнює 1. Операція згортки зображення f_n з ядром w спрощено записується у вигляді

$$g_c = f_n * w. \quad (3)$$

Ядро фільтра w описується двовимірною функцією Гауса

$$w(m, n) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{((m - m_c)^2 + (n - n_c)^2)}{2\sigma_w^2}\right), \quad (4)$$

де σ_w — СКВ розподілу Гауса; $m = 1, \dots, M_w$, $n = 1, \dots, N_w$; m_c та n_c — координати центру ядра фільтра за висотою і шириною відповідно.

Якщо на зображенні f_n присутній тільки гаусовий шум з СКВ σ_N , то значення кожного пікселя $f_n(i_1, k_1)$ можна розглядати як випадкову величину з дисперсією $D_N = \sigma_N^2$. Дисперсію гаусового шуму для довільного пікселя зображення $g_c(i, k)$, отриманого в результаті згортки f_n з ядром w (розміром $M_w \times N_w$ елементів) за формулою (2), обчислимо як дисперсію D_{NC} середнього арифметичного $M_w \times N_w$ однаково розподілених взаємно незалежних випадкових величин $f_n(i_1, k_1)$, помножених на відповідні елементи ядра $w(m, n)$. Тому дисперсія D_{NC} зображення g_c обчислюється за формулою

$$D_{NC} = D(g_c(i, k)) = D\left(\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} f_n(i_1, k_1) \cdot w(m, n)\right) = D_N \sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m, n), \quad (5)$$

де D_N — дисперсія кожної з випадкових величин $f_n(i_1, k_1)$, $D_N = D(f_n(i_1, k_1))$; $i_1 = i - m + m_c$, $k_1 = k - n + n_c$. У формулі (5) використані

такі властивості дисперсії: постійний множник можна винести за знак дисперсії, піднісши його до квадрату; дисперсія суми незалежних величин дорівнює сумі дисперсії складових [8].

СКВ гаусового шуму σ_{NC} для зображення g_c обчислимо через його дисперсію (5) за формулою

$$\sigma_{NC} = \sqrt{D_{NC}} = \sqrt{D_N} \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m, n)} = \sigma_N \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m, n)}. \quad (6)$$

Формула (6) показує зменшення СКВ гаусового шуму σ_{NC} в результаті згортки зображення f_n з ядром w фільтра Гауса з СКВ σ_w (табл. 1). Якщо всі коефіцієнти ядра w однакові і дорівнюють $1/(M_w \times N_w)$, формула (6) зводиться до класичного вигляду [8]:

$$\sigma_{NC} = \sigma_N \sqrt{M_w \cdot N_w \cdot \frac{1}{(M_w \cdot N_w)^2}} = \frac{\sigma_N}{\sqrt{M_w \cdot N_w}}. \quad (7)$$

Отримана формула (6) дає змогу обчислити СКВ гаусового шуму σ_{NC} на зображенні після згортки на основі СКВ шуму σ_N на зображенні до згортки. Отримана залежність σ_{NC} від σ_N вірна тільки для тих областей зображення, на яких переважає гаусовий шум. Тому залежність σ_{NC} від σ_N використана для виділення області ROI.

Таблиця 1. Значення СКВ гаусового шуму σ_{NC} на зображенні g_c , отриманому шляхом згортки зображення f_n ($\sigma_N = 5\%$) з ядром фільтра Гауса з СКВ σ_w

σ_w	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	5,00	7,00
$\sigma_{NC}, \%$	1,411	1,129	0,941	0,808	0,707	0,283	0,202

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГАУСОВОГО ШУМУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ

Інтенсивність початкового зображення f_n (рис. 1а) є сумою інтенсивності корисного сигналу f_S і гаусового шуму f_N з теоретичним СКВ σ_N . Для визначення рівня шуму на зображенні f_n потрібно максимально видалити корисний сигнал f_S і зберегти тільки шум f_N для подальшого аналізу. При видаленні корисного сигналу врахуємо той факт, що його частоти нижчі за частоти гаусового шуму, тому зображення g_c (рис. 1б), отримане при низькочастотній фільтрації зображення f_n , описує в основному корисний сигнал f_S . Фільтрація зображення f_n виконується шляхом його згортки з ядром фільтра Гауса з СКВ σ_w за формулою (2), в результаті чого

обчислюється згладжене зображення g_c . Якщо відняти згладжене зображення g_c від початкового f_n , то отримаємо зображення шумової складової f_h (рис. 1в), інтенсивність якого визначається в основному шумом f_N

$$f_h = f_n - f_c. \quad (8)$$

На зображенні шумової складової f_h контурам і текстурам відповідає локальне збільшення амплітуди f_h , тому такі локальні області слід виключити із області ROI для зменшення похибки при обчисленні СКВ шуму σ_{NE} . Виявлення областей контурів і текстур передбачає просторове усереднення рівня шуму на зображенні f_h , для чого спочатку обчислюється зображення f_d (рис. 1г) як абсолютна величина f_h , а потім виконується згортка зображення f_d з ядром фільтра Гауса з СКВ σ_w , в результаті чого отримується усереднене зображення рівня шуму f_{dc} (рис. 1д):

$$f_{dc} = f_d * w. \quad (9)$$

Усереднення виконується саме для зображення f_d (абсолютної величини f_h), оскільки зображення f_h знакозмінне. Піксель зображення f_h належить до області ROI тільки тоді, якщо значення відповідного пікселя f_{dc} не перевищує встановлений поріг T_h (рис. 1е). Належність пікселів зображення f_h до області ROI записується в матриці f_{ROI} і визначається за таким правилом:

$$f_{ROI}(i, k) = \begin{cases} 1, & f_{dc}(i, k) \leq T_h \\ 0, & f_{dc}(i, k) > T_h \end{cases}, \quad (10)$$

де $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$, T_h — поріг області ROI, f_{dc} — усереднене зображення рівня шуму.

Експериментальне значення СКВ шуму σ_{NE} обчислюється через СКВ σ_h для розподілу Гауса, який описує гістограму $h(z)$ зображення f_h . Початкове значення σ_h обчислюється для всього зображення f_h (рис. 1в), після обчислення області ROI значення σ_h обчислюється тільки з врахуванням тих пікселів f_h , які належать ROI (рис. 1е). Для зображення f_{ROI} обчислюється також відносна площа A_{ROI} пікселів, які належать ROI (рис. 1е); значення A_{ROI} не може бути меншим за мінімальну допустиму площу A_{ROI_min} . Поріг T_h , який визначає належність пікселя зображення до ROI (10), обчислюється за формулою

$$T_h = z_C + k_{\sigma Th} \cdot \sigma_{fdc}, \quad (11)$$

де z_C — математичне сподівання f_{dc} ; σ_{fdc} — СКВ f_{dc} ; $k_{\sigma Th}$ — коефіцієнт порогу.

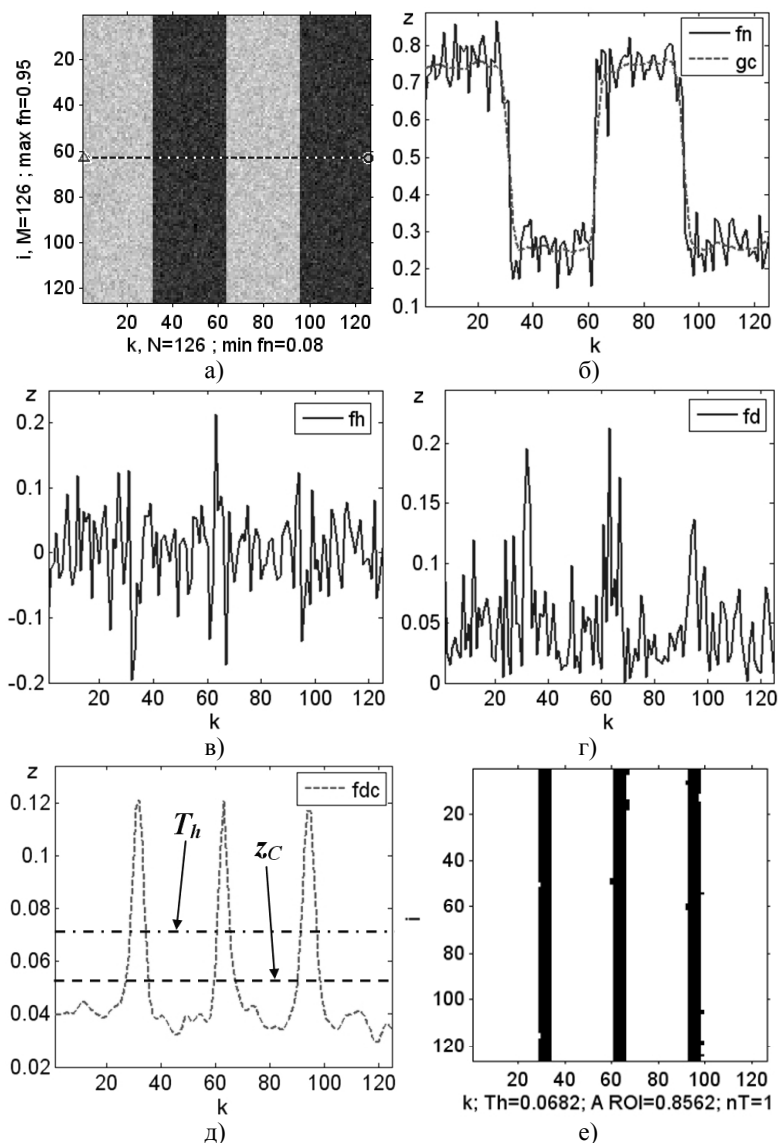


Рис. 1. Приклад визначення рівня гаусового шуму на зображенні, до якого програмно додано гаусовий шум з $\sigma_N = 5\%$ (для ітерації $n_T = 1$): а) початкове зображення f_n (маркерами вказані початок і кінець профілю — рис. 1б); б) профілі початкового f_n і згладженого g_c зображень; в) профіль зображення шумової складової f_h , $\sigma_h = 0,0685$ — СКВ зображення f_h ; г) профіль зображення f_d ; д) профіль усередненого зображення рівня шуму f_{dc} , $T_h = 0,0685$ — поріг f_{dc} , $z_c = 0,0502$ — математичне сподівання f_{dc} ; е) зображення області ROI (чорні області не відносяться до ROI), $\sigma_h = 0,0502$ — СКВ зображення f_h з врахуванням ROI; СКВ ядра фільтра Гауса $\sigma_w = 1,75$

Математичне сподівання z_C зображення f_{dc} , яке отримується в результаті згортки абсолютної величини зображення f_h з ядром w , обчислюється як середнє арифметичне відхилення [9] для розподілу інтенсивності зображення f_h . Оскільки на зображенні f_h переважає гаусовий шум з СКВ σ_h , то

$$z_C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_h = 0.798 \sigma_h. \quad (12)$$

Значення σ_{fdc} зображення f_{dc} обчислюється за формулою (6), в якій невідоме значення СКВ шуму σ_N замінимо на його наближення σ_h :

$$\sigma_{fdc} = \sigma_h \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m, n)}. \quad (13)$$

Значення коефіцієнту порогу $k_{\sigma Th}$ вибираються так, щоб для зображення f_{dc} більшість значень гаусового шуму були меншими за поріг T_h (11). За правилом 3σ при $k_{\sigma Th} = 3$ практично всі значення гаусового шуму ($> 99,7\%$) [8] будуть меншими за поріг T_h .

СКВ шуму σ_{NE} (у відсотках) пропорційне до СКВ σ_h , тому в першому наближенні

$$\sigma_{NE} = \sigma_h \cdot 100. \quad (14)$$

Визначення рівня гаусового шуму на зображеннях методом виділених областей здійснюється за таким алгоритмом (рис. 2). Спочатку зчитується початкове зображення f_n і створюється ядро w фільтра Гауса з СКВ σ_w . На основі f_n отримується згладжене зображення g_c за формулою (2), обчислюються зображення шумової складової f_h за формулою (8) та її модуля f_d . Усереднене зображення рівня шуму f_{dc} обчислюється шляхом згортки зображення f_d з ядром фільтра w (9). Для зображення f_h обчислюється СКВ σ_h його гістограми $h(z)$. Далі в циклі з лічильником n_T здійснюється процес уточнення області ROI та відповідного їй СКВ σ_h зображення f_h . Для кожної ітерації обчислюється поріг T_h (11), який згідно формул (12) і (13) залежить від σ_h . На основі порогу і усередненого зображення рівня шуму f_{dc} обчислюється зображення області ROI, де функція ψ_1 описується формулою (10). Значення СКВ σ_h обчислюється з врахуванням тільки тих пікселів f_h , які належать ROI. Якщо зміна σ_h для ітерації n_T відносно попереднього значення $\sigma_h(n_T - 1)$ не перевищує константи $\Delta_{\sigma h}$ (наприклад, $\Delta_{\sigma h} = 0.004$), то процес уточнення σ_h завершується і результатом є останнє значення $\sigma_{hs} = \sigma_h(n_T)$.

Експериментальне значення СКВ шуму σ_{NE} обчислюється за уточненим СКВ σ_{hs} , де функція ψ_2 описується формулою (14).

В результаті визначення рівня гаусового шуму для серії тестових зображень з низькочастотним та високочастотним корисним сигналом [10], до яких попередньо програмно додавався гаусовий шум з СКВ σ_N , отримано мінімальну середню квадратичну похибку обчислення експериментального СКВ шуму σ_{NE} (відносно σ_N) за таких умов:

1. Значення СКВ для ядра фільтра Гауса $\sigma_w = 1,75$ як при обчисленні згладженого зображення g_c , так й при згортці зображення f_d (рис. 1). Для вибраного значення σ_w на зображенні f_h в основному міститься шумова складова.

2. Поріг T_h області ROI обчислюється за формулою (11) для значення коефіцієнту порогу $k_{\sigma Th} = 1,22$ і СКВ ядра фільтра Гауса $\sigma_w = 1,75$, тому формула (11) з врахуванням формул (12) і (13) зводиться до вигляду

$$T_h = 0.798 \sigma_h + 1.22 \cdot 0.162 \sigma_h = 0.995 \sigma_h. \quad (15)$$

3. Експериментальне СКВ шуму σ_{NE} (у відсотках) обчислюється за СКВ σ_{hs} з використанням модифікованої формули (14):

$$\sigma_{NE} = (\sigma_{hs} \cdot 100)^{k_{\sigma h}}, \quad (16)$$

де $k_{\sigma h} = 1,018$ — коефіцієнт нелінійності σ_{hs} .

Коефіцієнт $k_{\sigma h}$ враховує той факт, що при вибраному σ_w (СКВ ядра фільтра Гауса) на зображенні f_h міститься не вся шумова складова, а це призводить до зменшення σ_{hs} .

З урахуванням вищенаведених умов за алгоритмом (рис. 2) проведено визначення рівня гаусового шуму на зображенні f_n (рис. 1а), в результаті чого отримано уточнене зображення області ROI, а також відповідні їй значення σ_{hs} та σ_{NE} (рис. 3, табл. 2). Обчислене значення рівня шуму σ_{NE} близьке до теоретичного σ_N (різниця складає 0,08 %).

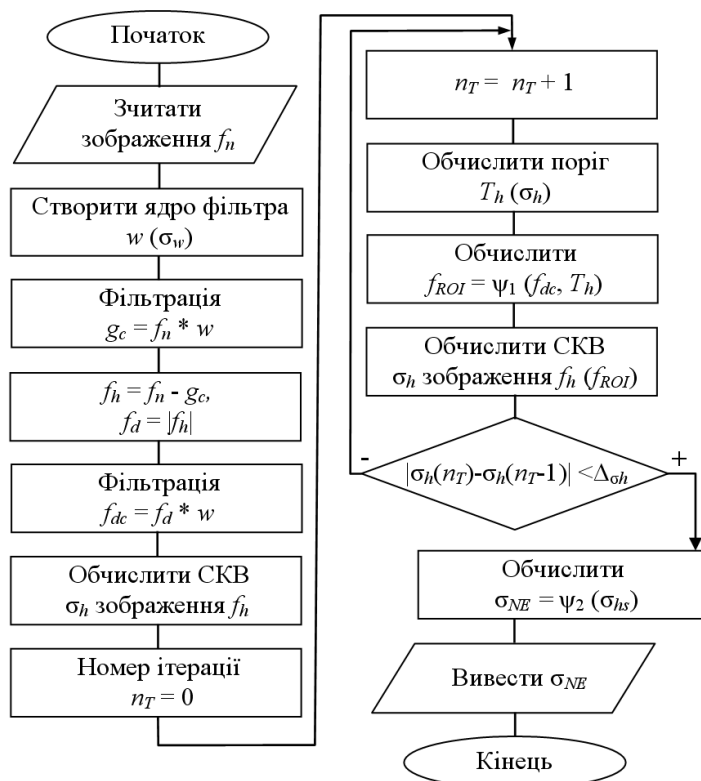


Рис. 2. Схема алгоритму визначення рівня гаусового шуму на зображенні методом виділених областей.

Таблиця 2. Послідовність визначення експериментального рівня гаусового шуму σ_{NE} на зображенні (рис. 1а) з $\sigma_N = 5\%$; n_T — номер ітерації, σ_h — СКВ зображення f_h , T_h — поріг області ROI; $\sigma_{NE} = 4,92\%$

n_T	0 (аналізується все зображення f_h)	1	2	3
σ_h	0,0685	0,0502	0,0486	0,0479
T_h	-	0,0682	0,0499	0,0483

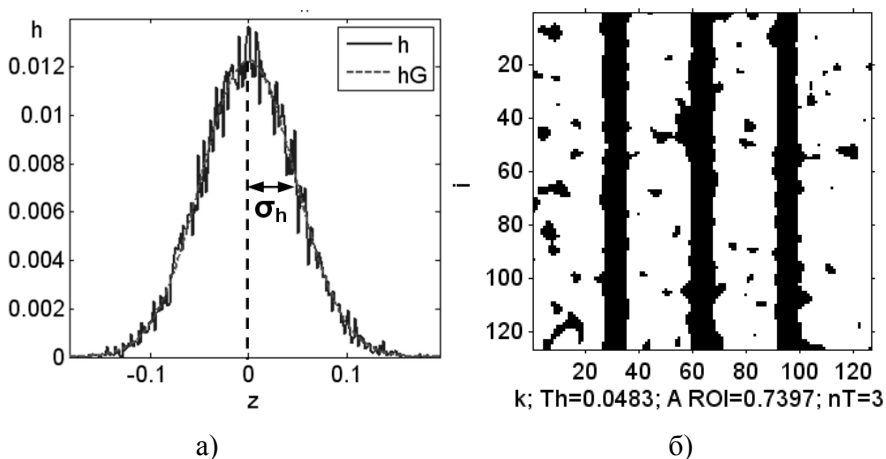


Рис. 3. Приклад визначення експериментального рівня гаусового шуму σ_{NE} на зображенні (рис. 1а) з $\sigma_N = 5\%$ (для останньої ітерації $n_T = 3$): а) гістограма $h(z)$ зображення шумової складової f_h (з врахуванням ROI), $\sigma_h = 0,0479$, h_G — розподіл Гауса, який описує гістограму $h(z)$; б) зображення області ROI; $\sigma_{NE} = 4,92\%$

МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГАУСОВОГО ШУМУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ

Розроблений алгоритм забезпечує високу точність обчислення рівня шуму для більшості зображень, проте для зображень з певним типом текстур (рис. 4а) він дає занижені значення σ_{NE} (рис. 4б). Тому з метою підвищення точності обчислення σ_{NE} проведено модифікацію алгоритму, в результаті якої СКВ σ_h зображення f_h обчислюється у два етапи. На першому етапі σ_h обчислюється у звичайному режимі, а на другому етапі — для зміненого значення мінімальної допустимої площі A_{ROI_min} області ROI, яке обчислюється за допомогою лінійних обмежених функцій на основі σ_h :

$$A_{ROI_min} = \begin{cases} A_{R3}, \sigma_h > \sigma_{hs3} \\ A_{R2} + (\sigma_h - \sigma_{hs2}) \frac{A_{R3} - A_{R2}}{\sigma_{hs3} - \sigma_{hs2}}, \sigma_{hs2} \leq \sigma_h \leq \sigma_{hs3} \\ A_{R1} + (\sigma_h - \sigma_{hs1}) \frac{A_{R2} - A_{R1}}{\sigma_{hs2} - \sigma_{hs1}}, \sigma_{hs1} \leq \sigma_h < \sigma_{hs2} \\ A_{R1}, \sigma_h < \sigma_{hs1} \end{cases}, \quad (17)$$

де $A_{R1} = 0,010$, $A_{R2} = 0,175$, $A_{R3} = 0,300$, $\sigma_{hs1} = 0,035$, $\sigma_{hs2} = 0,045$, $\sigma_{hs3} = 0,075$.

Уточнення значення A_{ROI_min} дозволяє при більших значеннях σ_h , обчислених у першому етапі, збільшувати A_{ROI_min} для другого етапу, що приводить до підвищення точності обчислення результуючого σ_{hs}

(рис. 4в). Дана емпірична формула (17) враховує той факт, що при збільшенні рівня шуму відносна площа області ROI на зображенні збільшується [4]. В результаті модифікації алгоритму корінь середньої квадратичної помилки обчислення σ_{NE} зменшено на $\approx 0,1$ %.

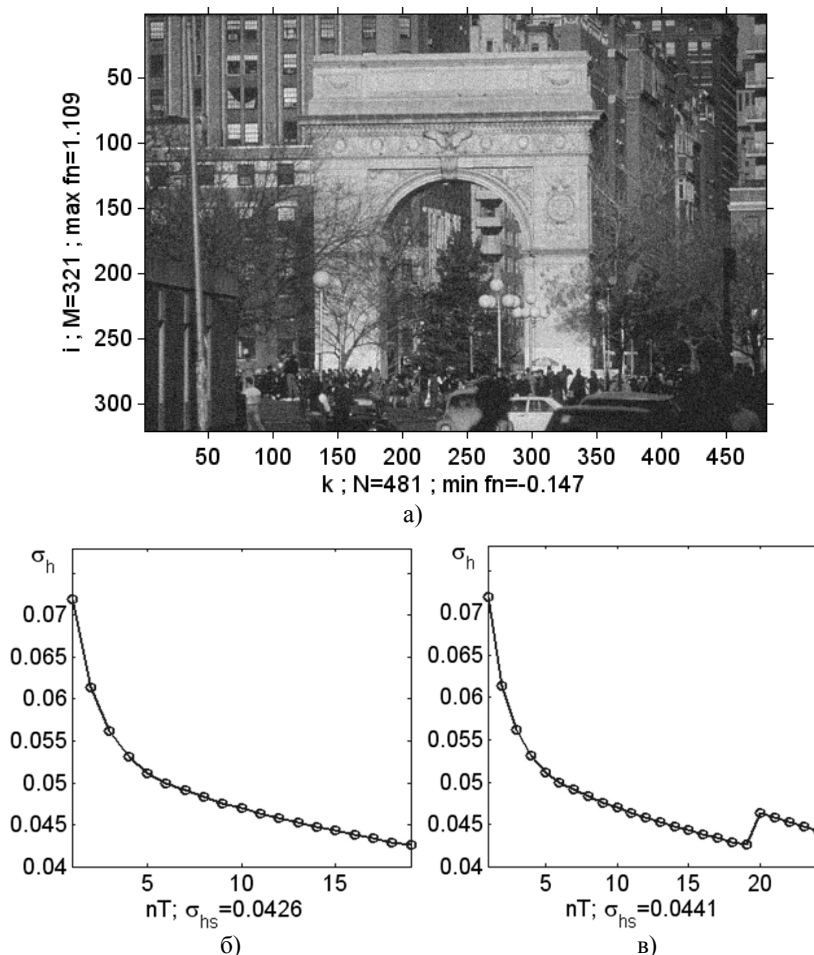


Рис. 4. Приклад визначення експериментального рівня гаусового шуму σ_{NE} на зображенні з текстурами «148089» [11, 12] ($\sigma_N = 5\%$): а) початкове зображення f_n ; б) графік ітераційного уточнення $\sigma_h(n_T)$ для початкового алгоритму (рис. 2); $\sigma_{NE} = 4,37$ %; в) графік $\sigma_h(n_T)$ для модифікованого алгоритму; $\sigma_{NE} = 4,53$ %, сходинок на графіку означає початок 2 етапу (для $n_T = 20$)

ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГАУСОВОГО ШУМУ НА ЗОБРАЖЕННІ

Перевірку точності розробленого методу визначення рівня гаусового шуму на зображенні, заснованому на виділенні та аналізі області ROI, проведено під час обчислення експериментального СКВ σ_{NE} гаусового шуму для серії зображень (рис. 5). Виконано порівняння результатів визначення експериментального рівня гаусового шуму з результатами визначення за допомогою стандартного методу [11, 12].

периментального СКВ σ_{NE} (%) гаусового шуму статистичним методом [7], методом PCAP (методом головних компонент з селективними областями, PCA with selected patches) [4] та запропонованим методом (рис. 5) для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [11, 12], до яких програмно додано гаусовий шум з СКВ σ_N (табл. 3).

Для більшості зображень, які не містять яскраво виражених текстур, обчислені запропонованим методом значення СКВ σ_{NE} практично не відрізняються від теоретичних σ_N (рис. 5). Найбільша похибка обчислення σ_{NE} отримана для зображення «86016.jpg» з номером 28 (рис. 5), оскільки майже всю його площу займають текстури, подібні до шуму (рис. 6).

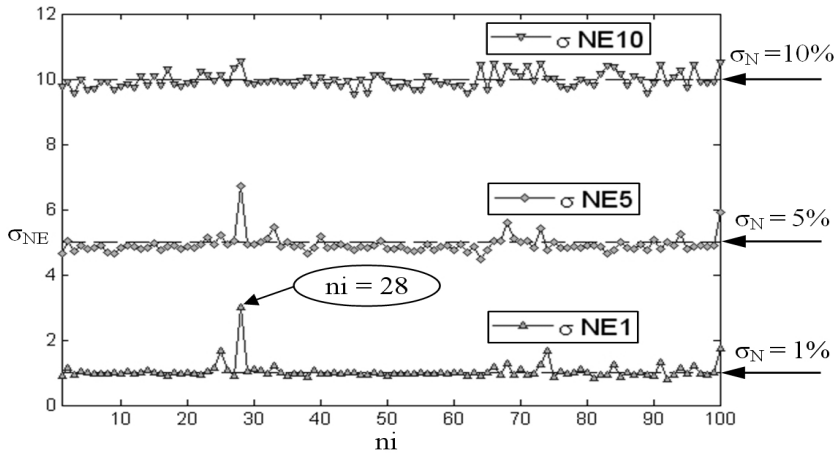


Рис. 5. Результати визначення експериментального СКВ σ_{NE} гаусового шуму запропонованим методом для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [11, 12], до яких програмно додано гаусовий шум з СКВ σ_N (1%, 5% та 10%); n_i — номер зображення в базі; σ_{NE1} , σ_{NE5} , σ_{NE10} — експериментальні значення СКВ шуму для $\sigma_N = 1\%$, 5% та 10%

Таблиця 3. Порівняння результатів визначення СКВ σ_{NE} (%) гаусового шуму різними методами; σ_{NEA} — середнє значення σ_{NE} ; R_{MSE} — корінь середньої квадратичної помилки між значеннями σ_{NE} та σ_N

$\sigma_N, \%$	Статистичний метод		PCAP		Запропонований метод	
	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}
1	2,151	2,011	1,068	0,304	1,034	0,253
5	4,994	1,445	5,022	0,263	4,921	0,277
10	9,737	1,61	10,052	0,264	9,956	0,240
1..10		1,705		0,278		0,257

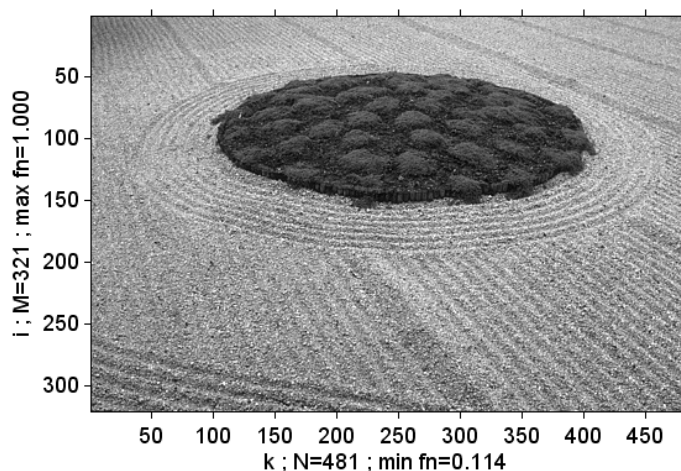


Рис. 6. Зображення «86016» [11, 12] з яскраво вираженими текстурами

Результати визначення експериментального СКВ σ_{NE} гаусового шуму для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [11, 12] (табл. 3) показують, що похибка R_{MSE} запропонованого методу на порядок менша за похибку статистичного методу і у більшості випадків менша за похибку методу PCAP. Запропонований метод також показав високу збіжність — для виділення області ROI потрібно в середньому 6 ітерацій.

ВИСНОВКИ

Розроблений метод автоматичного визначення рівня шуму на цифрових зображеннях, а саме СКВ σ_{NE} гаусового шуму, полягає у виділенні області ROI, на якій присутній в основному шум, в обчисленні гістограми виділеної області, СКВ σ_h гістограми та в розрахунку рівня шуму σ_{NE} на основі значення σ_h .

Побудована математична модель фільтрації зображень з гаусовим шумом, яка базується на низькочастотній фільтрації зображень, дозволяє виділити області ROI, на яких переважає гаусовий шум.

Проведено модифікацію алгоритму визначення рівня гаусового шуму на зображеннях, яка полягає в уточненні значення мінімальної допустимої площі області ROI, що зменшує корінь середньої квадратичної помилки обчислення рівня шуму σ_{NE} на $\approx 0,1$ %.

Запропонований метод програмно реалізовано в системі MATLAB. Точність методу перевірено під час оброблення множини 100 тестових зображень, при цьому корінь середньої квадратичної помилки обчислення σ_{NE} дорівнює 0,257 %.

Запропонований алгоритм використовує простий метод аналізу гістограми для розподілу яскравості зображення в області ROI, але за рахунок точного виділення області ROI забезпечує меншу похибку обчислення σ_{NE} , ніж найточніші сучасні методи, зокрема PCAP.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Bovik A.L. The Essential Guide to Image Processing . Elsevier Inc., 2009. 853 p.
3. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М. : Техносфера, 2006. 616 с.
4. Liu X., Tanaka M., Okutomi M. Single-Image Noise Level Estimation for Blind Denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013. Vol. 22, No. 12. P. 5226–5237.
5. Pyatykh S., Hesser J., Zheng L. Image noise level estimation by principal component analysis. *IEEE Transaction on Image Processing*. 2013. Vol. 22, No. 2. P.687–699.
6. Гольцев А.Д., Гриценко В.И. Алгоритм последовательного определения характерных признаков однородных текстурных областей для задачи сегментации изображений. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 173. С. 25–35.
7. Zoran D., Weiss Y. Scale invariance and noise in natural images. *Proc. IEEE 12th Int. Conf. Comput. Vis.*, Sep./ Oct. 2009. P. 2209–2216.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : Учеб. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 2003. 479 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
10. Image Processing Place. Image Databases. URL : http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm.
11. Fowlkes C., Martin D., Malik J. Local Figure/Ground Cues are Valid for Natural Images. *Journal of Vision*. 2007. Vol. 7 (8), No. 2. P. 1–9.
12. The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. BSDS300. URL: <https://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds>.

Отримано 17.02.2017

REFERENCES

1. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. M. : Technosphere, 2005. 1072 p. (in Russian).
2. Bovik A.L. The Essential Guide to Image Processing. Elsevier Inc., 2009. 853 p.
3. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital image processing using MATLAB. M. : Technosphere, 2006. 616 p. (in Russian).
4. Liu X., Tanaka M., Okutomi M. Single-Image Noise Level Estimation for Blind Denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013. Vol. 22, No. 12. P. 5226–5237.
5. Pyatykh S., Hesser J., Zheng L. Image noise level estimation by principal component analysis. *IEEE Transaction on Image Processing*. 2013. Vol. 22, No. 2. P.687–699.
6. Goltsev A.D., Gritsenko V.I. Algorithm of sequential finding the textural features characterizing homogeneous texture segments for the image segmentation task. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2013. Vol. 173. P. 25–35. (in Russian).
7. Zoran D., Weiss Y. Scale invariance and noise in natural images. *Proc. IEEE 12th Int. Conf. Comput. Vis.*, Sep./ Oct. 2009. P. 2209–2216.
8. Gmurman V.E. Theory of Probability and Mathematical Statistics : Textbook for high schools. M. : Vyssh. shk., 2003. 479 p. (in Russian).
9. Korn G., Korn T. Mathematical handbook. For scientists and engineers. M. : Nauka, 1974. 832 p. (in Russian).
10. Image Processing Place. Image Databases. URL: http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm.
11. Fowlkes C., Martin D., Malik J. Local Figure/Ground Cues are Valid for Natural Images. *Journal of Vision*. 2007. Vol. 7 (8), No. 2. P. 1–9.
12. The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. BSDS300. URL: <https://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds>.

Received 17.02.2017

С.В. Баловсяк, канд. физ.-мат. наук, доцент,
доцент кафедры компьютерных систем и сетей
e-mail: s.balovsyak@chnu.edu.ua.

Х.С. Одайская, аспирант кафедры компьютерных систем и сетей
e-mail: k.odaiska@chnu.edu.ua

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, 58012, г. Черновцы, Украина

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ГАУССОВСКОГО ШУМА НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Разработан метод автоматического определения уровня шума на цифровых изображениях, а именно среднего квадратичного отклонения гауссовского шума. Уровень шума вычисляется через среднее квадратичное отклонение гистограммы для выделенной области изображения, на которой имеется, в основном, шум. Предложенный метод программно реализован в системе MATLAB. При обработке тестовых изображений предложенным методом получена меньшая погрешность вычисления уровня шума, чем при использовании других современных методов.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, определение уровня шума, среднее квадратичное отклонение гауссовского шума, гистограмма изображения.

S.V. Balovsyak, PhD (Phys-Math), Docent

Associate Professor (Docent) of the Department of Computer Systems and Networks

e-mail: s.balovsyak@chnu.edu.ua

Kh. S. Odaiska, Postgraduate Student of the Department of Computer Systems and Networks

e-mail: k.odaiska@chnu.edu.ua

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kotsyubynsky St., 2,
58032, Chernivtsi, Ukraine

AUTOMATIC DETERMINATION OF LEVEL OF GAUSSIAN NOISE IN DIGITAL IMAGES BY METHOD OF THE SELECTED REGIONS

Introduction. The noise level is an important parameter for common application tasks of digital image processing: noise removal, segmentation, recognition and other. At the experimental image processing the noise level in most cases is unknown, so development of a method for automatic and accurate determination of noise level in images is an actual and important for practice task [1–7]. Additive White Gaussian Noise (AWGN) belongs to the widespread noise model, since many noises in the real images are described rather accurately by the AWGN model [1]. For this reason this article will consider the methods of noise level determination in the images within the AWGN model, and this noise will further be called Gaussian noise for the sake of simplicity. Level of Gaussian noise is expressed by standard deviation of noise.

The purpose of the article is to develop an automatic method of Gaussian noise level determination in digital images, which uses the selection of image region based on its low-frequency filtering and performs calculation of noise level by analyzing of histograms of the selected region. The article is aimed at software implementation of the elaborated method in the MATLAB system and estimation of its accuracy by processing the collection of test images.

Methods. The method of the selected regions for calculation of Gaussian noise level, which involves the selection of image region and analysis of its histogram is used. Convolution operation to filter digital images is applied. For estimation of accuracy of noise level determination the root mean square error (RMSE) between the experimental and theoretical noise levels for the test images is used.

Results. The method of automatic determination of level of Gaussian noise in digital im-

ages is developed. A method consists in the selection of the image ROI (Region Of Interest) [1, 3], where the noise is mainly present, in the calculation of histogram of the selected region and standard deviation σ_h of histogram and in the calculation of experimental level of noise σ_{NE} based on value σ_h . If the σ_h variation does not exceed the established limit, the process of the ROI clarification is completed. The proposed method is software implemented in MATLAB system [3].

Conclusion. The mathematical model of image filtering with Gaussian noise is created. The created model allows selecting the ROI regions with the prevailed Gaussian noise [8, 9]. The modification of the algorithm for determining the level of Gaussian noise in images is implemented [10–12], which specifies the minimum permissive value of the ROI area, leading to reducing the root mean square error of calculation of noise level σ_{NE} on 0.1%.

The accuracy of the proposed method is studied by processing the set of 100 test images [11, 12], and the root mean square error of calculation σ_{NE} equals to 0.257%. The resulting error of calculation σ_{NE} is less, than the one obtained for the most accurate modern methods of determination of noise level [4, 5]. With the use of more precise method of the ROI noise level determination, different from histogram analysis, the accuracy of the proposed method can be improve.

Keywords: *digital image processing, noise level determination, standard deviation of Gaussian noise, histogram of image.*