

Б. В. КОВАЛЕНКО, В. В. ЛУКІН

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ МЕТРИК ДЛЯ АНАЛІЗУ СТИСНЕННЯ З ВТРАТАМИ ЗАШУМЛЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Предметом вивчення у статті є аналіз стиснення зображення із втратами за допомогою BPG кодера з використанням візуальних метрик як критерію якості. **Метою** є підтвердження наявності робочої точки для зображень різної складності для візуальних метрик якості. **Завдання:** провести аналіз для набору зображень різної складності, де зображення спотворені адитивним білим гаусівським шумом з різними значеннями дисперсії, побудувати та проаналізувати залежності для візуальних метрик якості зображень, надати рекомендації щодо вибору параметрів для стиснення в околі робочої точки. Були використані такі **методи:** методи математичної статистики; методи цифрового оброблення зображень. Отримано наступні **результати:** побудовано залежності метрик візуальної якості для зображень різного ступеня складності, ураженими шумом з дисперсією, що дорівнює 64, 100 і 196. З побудованих залежностей видно, що робоча точка присутня для зображень середньої та низької складності як для метрики PSNR-HVS-M, так і MS-SSIM. Наведено рекомендації щодо вибору параметра для стиснення на основі отриманих залежностей. **Висновки.** Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному: для нового методу стиснення з використанням Better Portable Graphics (BPG) доведено існування робочої точки для метрик візуальної якості, раніше такі дослідження проводились лише для метрики PSNR. До тестових зображень був штучно доданий адитивний гаусів шум, після чого вони були стиснуті з використанням методів, реалізованих в BPG кодері. Зображення були стиснуті з різними значеннями параметра Q , що дозволило отримати оцінки якості стиснених зображень при різних значеннях коефіцієнту стиснення. Отримані дані дозволили візуалізувати залежності метрики візуальної якості зображення від параметру Q . Виходячи з отриманих залежностей можна стверджувати, що робоча точка присутня як для метрики PSNR-HVS-M, так і для MS-SSIM для зображень середньої та малої складності, варто також відзначити що особливо чітко робоча точка помітна при великих значеннях дисперсії шуму. В якості рекомендації представлена формула для розрахунку значення параметра контролю стиснення (для випадку з кодером BPG це параметр Q) для зображень, спотворених шумом з дисперсією, що змінюється в досить широких межах, в припущенні, що дисперсія шуму априорно відома чи оцінена з високою точністю.

Ключові слова: стиснення зображень із втратами; Better Portable Graphics; MS-SSIM; PSNR-HVS-M.

Вступ

Світ не стоїть на місці і постійно розвивається, а разом із ним і технології. Майже у кожної людини на Землі є пристрій, за допомогою якого він може взаємодіяти з мережею. З кожним днем кількість інформації, що передається по мережах, збільшується. Більшу частину цієї інформації являє собою зображення та відео. Не стоять на місці і технології дистанційного зондування (ДЗ) з аерокосмічних носіїв (рис. 1), які вирішують велику кількість завдань у лісовому господарстві, гідрології, екологічному моніторингу, сільському господарстві [1]. Сучасні засоби ДЗ отримують величезну кількість даних завдяки наступному. По-перше, деякі системи проводять спостереження з високою періодичністю; по-друге, існує очевидна тенденція до поліпшення просторової роздільної здатності сенсорів і, таким чином, отримання



Рис. 1. Приклад зображення дистанційного зондування у відтінках сірого

зображень більшого розміру і, по-третє, більшість зображень ДЗ є багатоканальними. У зв'язку з цим завдання ефективного стиснення зображень ДЗ стало як ніколи актуальним [2, 3].

За останні роки були розроблені різні підходи, проте всі їх можна розділити на дві основні групи: стиск без втрат і стиск з втратами. Для стиску без втрат характерні наступні властивості: він зберігає всю інформацію в стислому вигляді, проте значення коефіцієнта стиснення (КС) виявляються, як правило, невеликими і ними не можна керувати. У свою чергу, стиск із втратами дозволяє досягти більш високих значень КС. Проте водночас вносяться неминучі спотворення, які залежить від ступеня стиснення даних [4, 5].

Варто відзначити що досить часто на зображеннях може бути присутній шум досить високої інтенсивності. Це може бути пов'язано з умовами роботи сенсора або каналу передачі даних, а також самим принципом формування зображення. Ці аспекти необхідно враховувати під час стиснення та оцінки якості зображення, оскільки стиснення зображень, на яких присутній шум, із втратами має певні особливості, вперше помічені та описані в роботах [6, 7]. Було виявлено специфічний ефект придушення шуму внаслідок стиснення з втратами; крім того, була виявлена можливість існування оптимальної робочої точки (ОРТ) [6, 7], де ОРТ – таке значення або діапазон значень параметра, що керує стисненням, при якому стиснуте зображення «ближче» до відповідного зображення без шуму, ніж вихідне (не стиснене) зображення відповідно до певної метрики.

Якщо ОРТ для вибраного зображення є, то рекомендується проводити стиск саме в ОРТ або її околі. Ця рекомендація підкріплена такими причинами: КС виявляється досить великим, а стиснене зображення має кращу якість у порівнянні з нестиснутим [8].

ОРТ існує не тільки для загальноприйнятих метрик, таких як середньоквадратична помилка (СКП, mean square error – MSE) або пікове відношення сигнал/шум (ПВСШ, peak signal-to-noise ratio – PSNR), але і для метрик, які враховують особливості людського зору (так званих метрик візуальної якості). Особливість даних метрик полягає в тому, що зорова система людини (human vision system – HVS) більш чутлива до певних видів спотворень і такі метрики можуть вимірювати такі відмінності і краще корелювати з тим, як люди сприймають такі відмінності (якість) зображень.

Варто відзначити, що характеристики стиснення зображення на околі ОРТ сильно залежать від вибраного кодера. Хороші кодери можуть забезпечити або більший коефіцієнт стиснення, або кращу якість стисненого зображення, в деяких випадках обидва критерії можуть бути задоволені одночасно.

Метою цієї статті є аналіз особливостей стиснення з втратами зображень, спотворених адитивним білим Гаусовим шумом. Особливості аналізу складаються у двох аспектах. По-перше, як метод стиснення використовується Better Portable Graphics (BPG), представлений відносно недавно [9, 10]. По-друге, для даного кодера нещодавно були проведені дослідження та доведено існування ОРТ для метрики PSNR. Однак такі дослідження не проводилися для метрик візуальної якості. У зв'язку з цим дана робота спрямована на те, щоб перевірити наявність ОРТ для метрик візуальної якості і дати практичні рекомендації з приводу параметрів кодера для стиснення в околі ОРТ.

1. Модель шуму та зображення

1.1. Особливості зображень

Важливу роль оцінці якості роботи алгоритмів стиснення грають властивості зображення і шуму. Залежно від них зображення можна сприйняти як незашумлене або, навпаки, спотворене якимось шумом. Також при оцінці якості важливо використовувати зображення з різною складністю [11]. У цьому плані майже всі зображення можна розділити на три категорії. Перша категорія – це зображення з високою складністю; такі зображення погано стискаються будь-якими кодерами, для них дуже складно зменшити шум [12]. Друга категорія – це прості зображення (з низькою складністю), для даної категорії зображень фільтрація більш ефективна, а стиснення з використанням методів стиснення без втрат також ефективніше. Остання категорія – зображення середньої складності, які по суті є проміжними між попередніми двома.

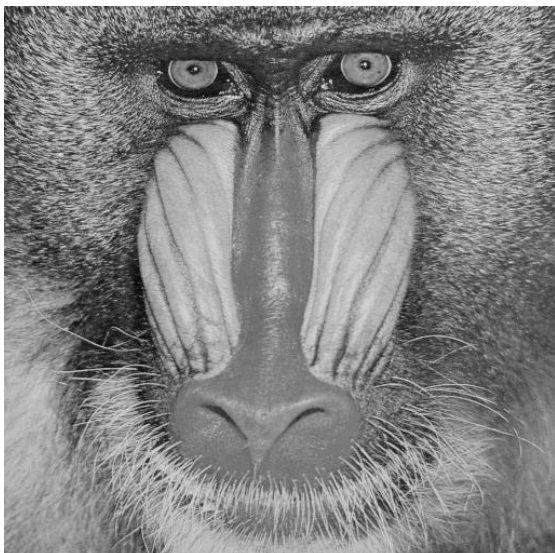
Оскільки в даній статті оцінюється якість стиснення нового BPG кодера, то доцільно скористатися наведеною вище класифікацією. Зображення, що використовуються в роботі та наведені на рис. 2, мають різні властивості. Зображення Baboon може бути класифіковано як складне, зображення Parrots – як зображення середньої складності, а зображення Lena як просте.

1.2. Властивості шуму

У цій роботі використовується найпростіша модель шуму – а саме адитивний білий гауссів шум

$$I_{ij}^n = I_{ij}^{\text{true}} + n_{ij}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad (1)$$

де I_{ij}^n – це значення зашумленого зображення в ij -м пікселі, I_{ij}^{true} – справжнє значення в ij -м пікселі, n_{ij} – шум у цьому ж пікселі, I, J – це розмір зображення.



а



б



в

Рис. 2. Незашумлені зображення різної складності: а – Baboon; б – Barbara; в – Lenna

Також припускається, що математичне очікування дорівнює нулю, а дисперсія шуму дорівнює σ^2 .

Оскільки в цій роботі ми маємо справу із зображеннями, доцільно відзначити, коли шум помітний на зображенні. Для слабо текстурованих (простих) зображень шум можна побачити при значенні дисперсії 15 і вище, а для високо текстурованих дане значення становить 25.

Інакше можна сказати, що шум на зображенні буде помітний, якщо значення PSNR не буде перевищувати 36дБ і 33дБ відповідно для слабо текстурованого і високо текстурованого зображень, де вхідний PSNR для зображення визначається наступним чином:

$$\text{PSNR}_{\text{inp}} = 10 \log_{10} (255^2 / \sigma^2). \quad (2)$$

Рисунок 3 показує приклад такого випадку. До двох тестових зображень був доданий шум з дисперсією, що дорівнює 64 ($\text{PSNR}_{\text{inp}} \approx 30$ дБ). Як видно з рисунка, шум добре помітний на слабо текстурованому зображенні в той час, як на високо текстурованому зображенні розрізнити його стає проблематично (шум помітний лише на квазіоднорідних ділянках).

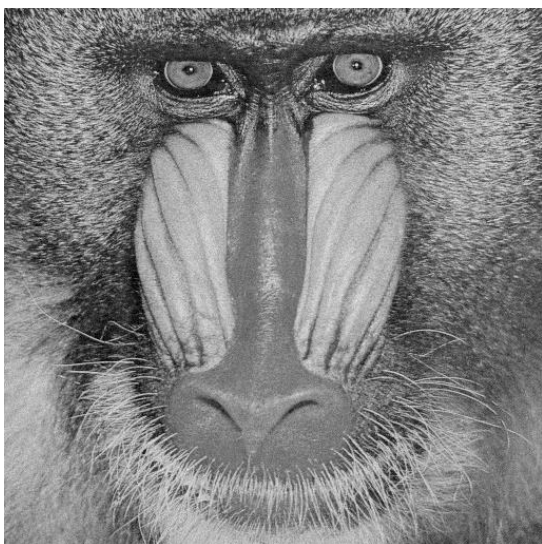
1.3. Використовуваний кодер

Як згадувалося раніше у цій статті, нами використовується новий BPG кодер. Цей кодер націлений на те, щоб перевершити класичні кодери, наприклад, JPEG. BPG має низку особливостей. По-перше, він має більший коефіцієнт стиснення – при тій же якості зображення розмір файлу виходить значно меншим. По-друге, він підтримує представлення даних від стандартних 8 до 14 біт на канал - це дозволяє отримати більш високий динамічний діапазон, а також кращий ступінь стиснення (за рахунок меншої кількості помилок при округленнях). Крім того, в даному кодері використовується 10 - і 7-ступінчасті фільтри Ланцоша для високоякісного проріджування та інтерполяції відповідно, для обробки зразків кольоровості у форматах 4: 2: 2 і 4: 2: 0 [9].

Щоб змінювати і контролювати КС в даному кодері використовується параметр, що позначається як Q. Даний параметр пов'язаний з кроком квантування і має таку властивість: чим вище його значення, тим більше коефіцієнт стиснення оброблюваного зображення. Також варто відзначити, що Q може набувати цілі значення в діапазоні від 0 до 51 за стандартом HEVC [6].



а



б

Рис. 3. Зашумлені тестові зображення:
а – Lena; б – Baboon

1.4. Аналізовані метрики

У цій роботі використовуються візуальні метрики якості стиснення зображення - це пов'язано з тим що, загальноприйняті метрики, такі як MSE (mean square error), SNR (signal-to-noise ratio) і PSNR, не завжди добре корелюють з реальною візуальною якістю зображення. Це послужило поштовхом до розвитку нових типів метрик, які можуть добре корелювати з тим, як людина оцінює зображення. Безпосередньо в цій роботі використовується два представники таких метрик - це PSNR-HVS-M і MS-SSIM.

Метрика PSNR-HVS-M може бути визначена як:

$$\text{PSNR-HVS-M} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\text{MSE}_{\text{nf}}^{\text{HVS-M}}} \right), \text{ дБ}, \quad (3)$$

де $\text{MSE}_{\text{nf}}^{\text{HVS-M}}$ розраховується для стисненого та справжнього зображень з урахуванням особливостей HVS. Варто відзначити деяку схожість цієї метрики з PSNR, а саме те, що вона, як і PSNR, виражається в децибелах і великі значення характеризують кращу якість [9]. Метрика $\text{MSE}_{\text{nf}}^{\text{HVS-M}}$, а відповідно і PSNR-HVS-M, враховують різну чутливість людського ока до спотворень на низьких і високих просторових частотах, а також враховує ефект маскування [13, 14].

Метрика MS-SSIM здатна поєднати кілька особливостей HVS. Ця метрика, на відміну від попередньої, має межі варіювання від 0 до 1, але так само, як і в попередньому випадку, більші значення характеризують кращу якість зображення [15].

Особливості даних метрик не дозволяють порівняти отримані значення між собою безпосередньо. Проте ми проаналізуємо дані з обох метрик і зробимо висновки на основі спільного аналізу.

2. Аналіз візуальних метрик

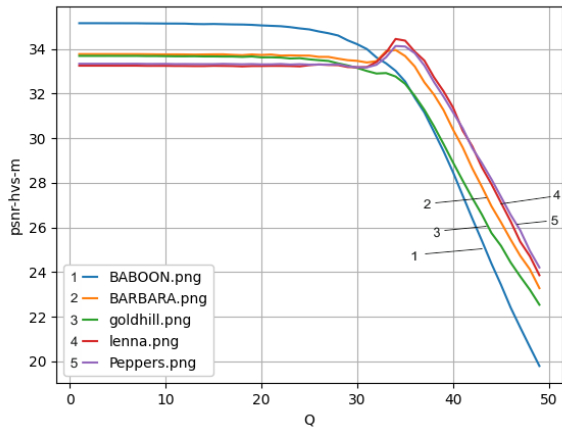
Враховуючи головну вимогу до стиску зображень з втратами, а саме отримання задовільної якості зображення при максимально великому коефіцієнті стиснення, приходимо до завдання знаходження компромісу. Для вирішення даної задачі використовують криву КС-спотворення (rate distortion curve) або її аналоги.

Загальноприйнятий спосіб побудови кривої КС-спотворення — це порівняння оригінального зображення (зо підлягає стиску) з відповідним стисненим зображенням, використовуючи метрику (в даному випадку або PSNR-HVS-M, або MS-SSIM) для різного значення параметра, що контролює стиск (для випадку з BPG кодером це параметр Q). Однак у нашому випадку ми будемо розраховувати і аналізувати значення метрик між стисненим і справжнім зображенням. Причини цього стануть зрозумілими пізніше.

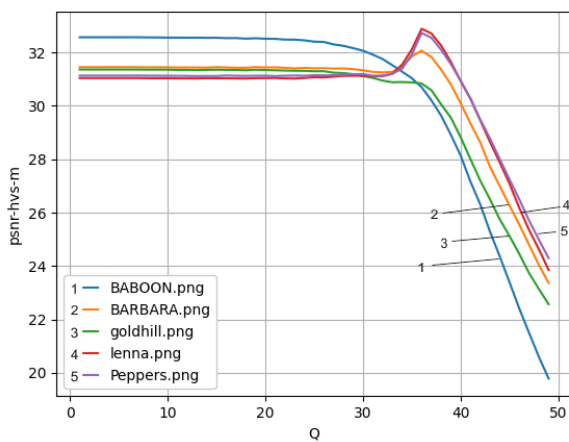
2.1. Залежності для PSNR-HVS-M та їх аналіз

Залежності PSNR-HVS-M від Q, побудовані для 5 тестових зображень для значень дисперсії шуму, рівної 64 (а), 100 (б) і 196 (в) представлені на рисунку нижче.

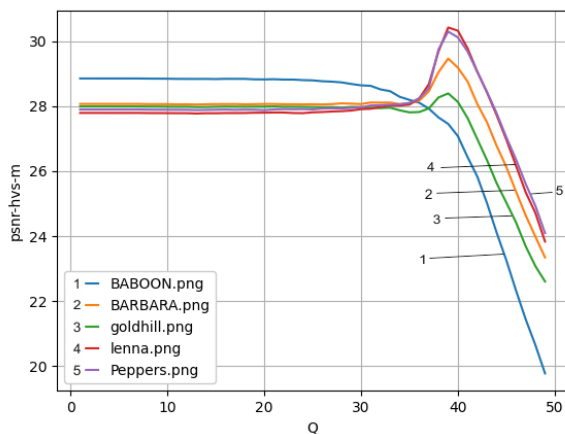
Для залежності на рис. 4, а справедливим буде твердження, що робоча точка спостерігається для зображень Peppers, Lena, Barbara при значенні $Q = 34$. Для складного зображення Baboon залежність монотонно зменшується і не має ОПТ. Для тестового зображення Goldhill залежність також монотонно спадає.



а



б



в

Рис. 4. Залежності PSNR-HVS-M від Q для стисненого та істинного зображень для значень дисперсії шуму, раною 64 (а), 100 (б) і 196 (в)

Наступний аналізований варіант - дисперсія шуму дорівнює 100 (рис. 4, б) має схожі з попереднім тенденції. Для зображень Peppers, Lena, Barbara так само спостерігається оптимальна робоча точка, проте при трохи більших значеннях ($Q = 36$), для зображення Baboon залежність монотонно зменшується,

як і минулого разу. Для зображення Goldhill є ділянка значень Q від 32 до 36, на якому значення PSNR-HVS-M практично не змінюються, проте вони все ж таки нижче, ніж на початковій ділянці, тобто формально ОПТ не спостерігається.

Для останнього випадку (рис. 4, в) при дисперсії шуму, що дорівнює 196, ОПТ спостерігається для всіх зображень, крім зображення Baboon. Однак значення Q стали більше, для зображень, у яких можна спостерігати ОПТ, воно становить 38. Також варто окремо відзначити, що при такій дисперсії шуму ОПТ почала спостерігатися і для зображення Goldhill, яке не мала її при менших значеннях дисперсії шуму.

2.2. Залежності для MS-SSIM та їх аналіз

Оскільки жодна з нині існуючих метрик візуальної якості не є ідеальною, нами було прийнято рішення використовувати також й іншу метрику, а саме MS-SSIM. Залежності, що отримані для даної метрики (між стислим і справжнім зображенням), представлені на рис. 5. Як і раніше, залежності були побудовані для значень дисперсії шуму, що дорівнюють 64 (а), 100 (б) і 196 (в).

У першому випадку (рис. 5, а) ОПТ спостерігається для всіх зображень, крім зображення Baboon. Для нього, як і для попередньої метрики, після $Q = 28$ значення метрики починають плавно зменшуватися. Для решти зображень робоча точка має місце при значенні $Q = 34$.

Для значення дисперсії шуму, що дорівнює 100 (рис. 5, б), ОПТ так само спостерігається для чотирьох зображень, але при значенні $Q = 36$.

Нарешті, для останнього варіанту дисперсії шуму, що дорівнює 196 (рис. 5, в) ОПТ спостерігається для зображень Peppers, Lena, Barbara, Goldhill для значень $Q = 39$, проте для складного зображення Baboon спостерігається локальний максимум при тому ж значенні Q .

3. Рекомендації щодо вибору параметрів для стиснення в ОПТ

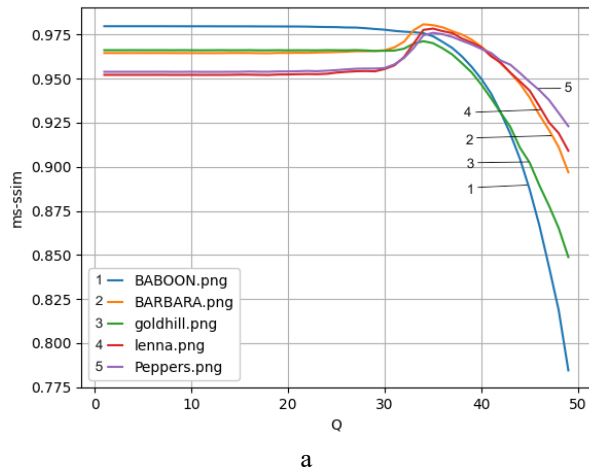
Хоча залежності, що отримані для двох метрик візуальної якості, дещо відрізняються (у плані присутності оптимальної робочої точки та її координат), проте, виходячи з отриманих залежностей на рис. 4 і 5, можна вивести рекомендації щодо вибору параметрів для стиснення в районі ОПТ.

Для простих і середніх за складністю зображень при адитивному білому Гауссовому шумі з дисперсією, що дорівнює 64, 100 і 196 рекомендованими значеннями Q є відповідно 34, 36 і 38. У першому

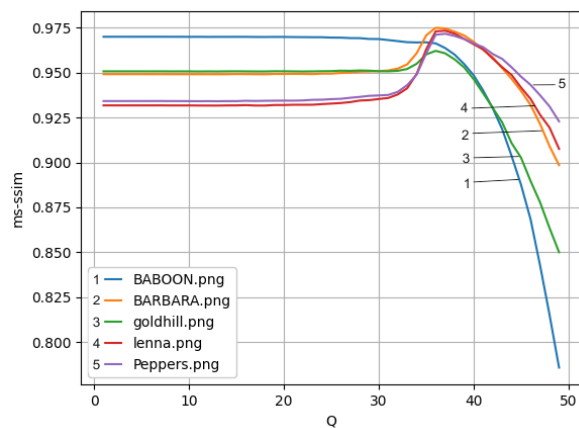
припущенні для визначення оптимального значення можна використовувати формулу:

$$Q=22 * 1g(4*\sigma). \quad (4)$$

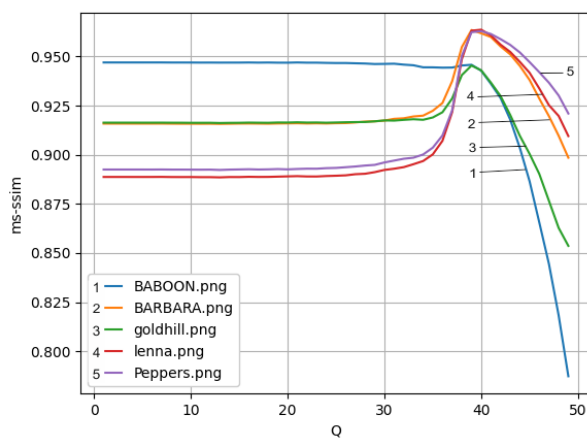
Однак надалі необхідно перевірити її застосовність для більшої кількості зображень.



а

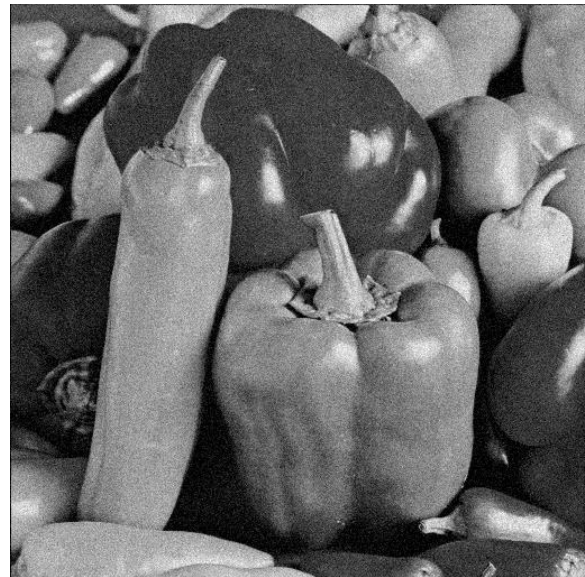


б



в

Рис. 5. Залежності MS-SSIM від Q для стислих і дійсних зображень для значень дисперсії шуму, рівних 64 (а), 100 (б) та 196 (в)



а



б

Рис. 6. Зашумлене зображення Peppers (а) і те саме зображення, стиснене в ОПТ (б), дисперсія шуму 196

Як витікає з (4), для стиску в околі ОПТ потрібно априорно знати або оцінити дисперсію завад. Також можливо, що для просторово-корельованого шуму координати ОПТ можуть бути іншими.

При стисненні зображення з втратами з використанням даних рекомендацій можна переконатися в присутності ефекту фільтрації, згаданого вище, при якому стиснення з втратами може забезпечувати поліпшення якості стисненого зображення.

На рис. 6 наведено приклад зашумленого стандартного тестового зображення (рис. 6, а), стисненого в околі ОПТ. Як видно з рисунка, шум добре помітний, особливо на однорідних ділянках. Аналіз стисненого зображення (рис. 6, б) показує, що шум

помітно зменшується, проте контури і деякі дрібні деталі трохи розмиваються. Загалом, стиснене зображення виглядає краще, ніж зашумлене. Варто відзначити, що даний висновок є суб'єктивним і деякі можуть не погодитися з цим твердженням.

Висновки

У цій статті представлений аналіз стиснення зображення з втратами за допомогою BPG кодера з використанням візуальних метрик як критерію якості. Виходячи з отриманих залежностей, підтверджено присутність OPT для зображень середньої та низької складності. Не дивлячись на невелику розбіжність у результатах для двох досліджених метрик, були дані рекомендації щодо встановлення значення Q (параметр контролю стиснення) для різних інтенсивностей шуму. У майбутньому слід провести аналіз на більшому наборі зображень, а також розробити метод до передбачення існування OPT.

Література

1. Efficient dimension reduction of hyperspectral images for big data remote sensing applications [Text] / B. Garcia-Salgado, V. Ponomaryov, S. Sadovnychiy, R. Reyes-Reyes // *J. of Applied Remote Sensing*. – 2020. – vol. 14, no. 3. – Article no. 032611. DOI: 10.1117/1.JRS.14.032611.
2. Manga, I. Lossless Image Compression Schemes: A Review [Text] / I. Manga, E. J. Garba, A. S. Ahmadu // *Journal of Scientific Research and Reports*. – 2021. – vol. 27, Iss. 6. – P. 14-22. DOI: 10.9734/jsrr/2021/v27i630398.
3. Image Compression Algorithm Based on Time Series [Text] / J. Chen, Z. Deng, Y. Wang, X. Cheng, Y. Ye, X. Zhang, J. Han // *Artificial Intelligence and Security*. – 2021. – P. 689-700. DOI: 10.1007/978-3-030-78609-0_58.
4. Hyperspectral data compression tradeoff [Text] / E. Christophe, S. Prasad, L. M. Bruce, J. Chanussot // *Optical remote sensing*, Heidelberg: Springer. – 2011. – Vol. 3. – P. 9-29. DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_2.
5. Zabala, A. Impact of lossy compression on mapping crop areas from remote sensing [Text] / A. Zabala, X. Pons // *International Journal of Remote Sensing*. – 2013. – vol. 34, no. 8. – P. 2796-2813. DOI: 10.1080/01431161.2012.750772.
6. Al-Shaykh, O. K. Lossy compression of noisy images [Text] / O. K. Al-Shaykh, R. M. Mersereau // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 1998. – vol. 7, no. 12. – P. 1641-1652. DOI: 10.1109/83.730376.
7. Chang, S. G. Image denoising via lossy compression and wavelet thresholding [Text] / S. G. Chang, B. Yu, M. Vetterli // *Proceedings of ICIP*. – 1997. – P. 604-607. DOI: 10.1109/ICIP.1997.647985.
8. Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study [Text] /

N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – Article no. 976436. DOI: 10.1155/2010/976436.

9. BPG Image format. Available [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bellard.org/bpg/>. – 27.09.2021.

10. Albalawi, U. A Hardware Architecture for Better Portable Graphics (BPG) Compression Encoder [Text] / U. Albalawi, S. P. Mohanty, E. Kougianos // *IEEE International Symposium on Nanoelectronic and Information Systems (iNIS)*. – 2015. DOI: 10.1109/iNIS.2015.12.

11. Бараник, В. В. Метод квадратурного сжатия трансформант вейвлет-преобразования в двумерном поладическом пространстве [Текст] / В. В. Бараник, А. В. Ширяев // *Сучасна спеціальна техніка*. – 2011. – № 2(25). – С. 73-80.

12. Chatterjee, P. Is Denoising Dead? [Text] / P. Chatterjee, P. Milanfar // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2010. – vol. 19, Iss. 4. – P. 895-911. DOI: 10.1109/TIP.2009.2037087.

13. New full-reference quality metrics based on HVS [Text] / K. Egiazarian, J. Astola, N. Ponomarenko, V. Lukin, F. Battisti, M. Carli // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Video Processing and Quality Metrics*. – 2006. – P. 1-4.

14. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, J. Astola, M. Carli, V. Lukin // *Proceedings of the 3rd International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics, VPQM 2007, Scottsdale, Arizona, USA, 25-26 January 2007*. – 4 p.

15. Wang, Z. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [Text] / Z. Wang, E. P. Simoncelli, and A. C. Bovik // *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. – 2003. – P. 1398-1402.

References

1. Garcia-Salgado, B., Ponomaryov, V., Sadovnychiy, S., Reyes-Reyes, R. Efficient dimension reduction of hyperspectral images for big data remote sensing applications. *J. of Applied Remote Sensing*, 2020, vol. 14, no. 3, article no. 032611. DOI: 10.1117/1.JRS.14.032611.
2. Manga, I., Garba, E. J., Ahmadu, A. S. Lossless Image Compression Schemes: A Review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2021, pp. 14-22. DOI: 10.9734/jsrr/2021/v27i630398.
3. Chen, J., Deng, Z., Wang, Y., Cheng, X., Ye, Y., Zhang, X., Han, J. Image Compression Algorithm Based on Time Series. *Artificial Intelligence and Security*, 2021, pp. 689-700. DOI: 10.1007/978-3-030-78609-0_58.
4. Christophe, E., Prasad, S., Bruce, L., M., Chanussot, J. Hyperspectral data compression tradeoff. *Optical*

remote sensing, Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, vol. 3, pp. 9-29. DOI: 10.1007/978-3-642-14212-3_2.

5. Zabala, A., Pons, X. Impact of lossy compression on mapping crop areas from remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, vol. 34, no. 8, pp. 2796-2813. DOI: 10.1080/01431161.2012.750772.

6. Al-Shaykh, O. K., Mersereau, R. M. Lossy compression of noisy images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, vol. 7, no. 12, pp. 1641-1652. DOI: 10.1109/83.730376.

7. Chang, S. G., Yu, B., Vetterli, M. Image denoising via lossy compression and wavelet thresholding. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 1997, pp. 604-607. DOI: 10.1109/ICIP.1997.647985.

8. Ponomarenko, N., Krivenko, S., Lukin, V., Egiazarian, K., Astola, J. Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, article no. 976436, 2010. DOI: 10.1155/2010/976436.

9. Bellard, F. *BPG Image format*. Available at: <https://bellard.org/bpg/>. (accessed 27.09.2021).

10. Albalawi, U., Mohanty, S. P., Kougiianos, E. A Hardware Architecture for Better Portable Graphics (BPG) Compression Encoder. *IEEE International Symposium on Nanoelectronic and Information Systems (iNIS)*, 2015. DOI: 10.1109/iNIS.2015.12.

11. Baranik, V. V., Shiryaev, A. V. Metod kvadraturnogo szhatiya transformant veivlet-preobrazovaniya v dvumernom poliadicheskom prostranstve [Method of quadrature compression of a wavelet transform transformant in a two-dimensional polyadic space]. *Suchasna spetsial'na tekhnika – Modern special technique*, 2011, no. 2 (25), pp. 73-80.

12. Chatterjee, P., Milanfar, P. Is Denoising Dead? *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, vol. 19, Iss. 4, pp. 895-911. DOI: 10.1109/TIP.2009.2037087.

13. Egiazarian, K., Astola, J., Ponomarenko, N., Lukin, V., Battisti, F., Carli, M. New full-reference quality metrics based on HVS. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Video Processing and Quality Metrics*, 2006, pp. 1-4.

14. Ponomarenko, N., Silvestri, F., Egiazarian, K., Astola, J., Carli, M., Lukin, V. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics, VPQM 2007*, Scottsdale, Arizona, USA, 25-26 January 2007. 4 p.

15. Wang, Z., Simoncelli, E. P., Bovik, A. C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment. *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2003, pp. 1398-1402.

Надійшла до редакції 12.10.2021, розглянуто на редколегії 26.11.2021

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНЫХ МЕТРИК ДЛЯ АНАЛИЗА СЖАТИЯ С ПОТЕРЯМИ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Б. В. Коваленко, В. В. Лукин

Предметом изучения в статье является анализ сжатия изображения с потерями с помощью BPG кодера с использованием визуальных метрик в качестве критерия качества. **Целью** является подтверждение наличия рабочей точки для изображений различной сложности для визуальных метрик качества. **Задача:** провести анализ для набора изображений разной сложности, где изображения искажены аддитивным белым гауссовским шумом с разными значениями дисперсии, построить и проанализировать зависимости для визуальных метрик качества изображения, предоставить рекомендации по выбору параметров для сжатия в окрестности рабочей точки. Были использованы следующие **методы:** методы математической статистики; методы цифровой обработки изображений. Получены следующие **результаты:** построены зависимости метрик визуального качества для изображений различной степени сложности пораженными шумом с дисперсией равной 64, 100 и 196. Из построенных зависимостей видно, что рабочая точка присутствует для изображений средней и низкой сложности как для метрики PSNR-HVS-M, так и для MS-SSIM. Даны рекомендации по выбору параметра для сжатия основываясь на полученных зависимостях. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: для нового метода сжатия с использованием Better Portable Graphics (BPG) было проведено исследование и доказано существование рабочей точки для метрик визуального качества, ранее такие исследования проводились лишь для метрики PSNR. Аддитивный гауссов белый шум был искусственным образом добавлен к тестовым изображениям, которые после этого были сжаты с использованием методов, реализованных в BPG кодере. Изображения были сжаты с различными значениями параметра Q, что позволило получить оценку качества сжатия изображения при различных значениях коэффициента сжатия. Полученные данные позволили визуализировать зависимости метрик визуального качества изображения от параметра Q. Исходя из полученных зависимостей можно утверждать, что рабочая точка присутствует как для метрики PSNR-HVS-M, так и для MS-SSIM для изображений средней и низкой сложности, стоит также отметить, что особенно отчетливо рабочая точка заметна при больших значениях дисперсии шума. В качестве рекомендации представлена формула для расчета значения параметра контроля сжатия (для случая с кодером BPG это параметр Q) для изображений, искаженных шумом с изменяющейся в достаточно широких пределах дисперсией, в предположении, что дисперсия шума априорно известна или оценена с высокой точностью.

Ключевые слова: сжатие изображений с потерями; Better Portable Graphics; MS-SSIM; PSNR-HVS-M.

USING VISUAL METRICS TO ANALYZE LOSSY COMPRESSION OF NOISY IMAGES

B. Kovalenko, V. Lukin

The **subject** of the article is to analyze the effectiveness of lossy image compression using a BPG encoder using visual metrics as a quality criterion. The **aim** is to confirm the existence of an operating point for images of varying complexity for visual quality metrics. The **objectives** of the paper are the following: to analyze for a set of images of varying complexity, where images are distorted by additive white Gaussian noise with different variance values, build and analyze dependencies for visual image quality metrics, provide recommendations on the choice of parameters for compression in the vicinity of the operating point. The methods used are the following: methods of mathematical statistics; methods of digital image processing. The following **results** were obtained. Dependencies of visual quality metrics for images of various degrees of complexity affected by noise with variance equal to 64, 100, and 196. It can be seen from the constructed dependence that a working point is present for images of medium and low complexity for both the PSNR-HVS-M and MS-SSIM metrics. Recommendations are given for choosing a parameter for compression based on the obtained dependencies. **Conclusions.** Scientific novelty of the obtained results is the following: for a new compression method using Better Portable Graphics (BPG), research has been conducted and the existence of an operating point for visual quality metrics has been proven, previously such studies were conducted only for the PSNR metric. The test images were distorted by additive white Gaussian noise and then compressed using the methods implemented in the BPG encoder. The images were compressed with different values of the Q parameter, which made it possible to estimate the image compression quality at different values of compression ratio. The resulting data made it possible to visualize the dependence of the visual image quality metric on the Q parameter. Based on the obtained dependencies, it can be concluded that the operating point is present both for the PSNR-HVS-M metric and for the MS-SSIM for images of medium and low complexity, it is also worth noting that, especially clearly, the operating point is noticeable at large noise variance values. As a recommendation, a formula is presented for calculating the value of the compression control parameter (for the case with the BPG encoder, it is the Q parameter) for images distorted by noise with variance varying within a wide range, on the assumption that the noise variance is a priori known or estimated with high accuracy.

Keywords: lossy image compression; Better Portable Graphics; MS-SSIM; PSNR-HVS-M.

Коваленко Богдан Віталійович – асп. каф. інформаційно-комунікаційних технологій імені О. О. Зеленьського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лукін Володимир Васильович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційно-комунікаційних технологій імені О. О. Зеленьського, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Bohdan Kovalenko – PhD student of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: svonton7@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9360-0691.

Vladimir Lukin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: lukin@ai.kharkov.ua, ORCID: 0000-0002-1443-9685.