

О.М. ГОЛОВІНІнститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *o.m.golovin.1@gmail.com*.

ПОКРАЩЕННЯ ВІДЕОПОСЛІДОВНОСТІ В СИСТЕМАХ ВІДЕОАНАЛІТИКИ

Анотація. Запропоновано метод покращення відео на основі застосування гамма-корекції. Процедура застосування методу полягає в обробленні всіх кадрів відео за допомогою єдиного підходу. В алгоритмі завдяки збереженню міжкадрової когерентності впродовж всього відео суттєво скорочено час пошуку оптимального значення параметра гамма, для якого якість кожного кадру відео досягає максимально можливого рівня в автоматичному режимі в сенсі як візуального спостереження, так і ефективності виявлення ключових точок та виділення контурів об'єктів у зображенні. Метод характеризується високою адаптивністю до різких змін в освітленні сцени, збереженням міжкадрової когерентності та відсутністю будь-яких побічних негативних артефактів у покращеному відео. Розроблено інструментарій визначення в автоматичному режимі оптимального значення параметра гамма, який дає змогу суттєво підвищити ефективність систем відеоаналітики, процесів сегментації та оброблення зображень і відео завдяки послабленню негативного впливу режиму освітлення сцени на якість зображень.

Ключові слова: гамма-корекція, система відеоаналітики, покращення відео, гістограма, кумулятивна гістограма, відеооброблення, міжкадрова когерентність.

ВСТУП

Головною метою будь-якої інтелектуальної системи відеоспостереження є розуміння ситуації у сцені [1]. Для її досягнення потрібно виділити всі або певні об'єкти у сцені уваги, визначити причинно-наслідкові зв'язки між ними та скласти прогноз майбутніх подій. Щоб прийняти єдине правильне рішення щодо ситуації у сцені уваги, потрібно мати якісні зображення з гарним контрастом і рівномірним освітленням усіх їхніх ділянок.

На якість зображень та відео, отриманих системою відеооброблення, впливає надто велика кількість факторів: технічні параметри відеосенсорів, слабкий або нерівномірний рівень освітлення, зміна рівня освітлення сцени через погодні умови (сильна хмарність, туман, відсутність або наявність сонячних променів), часові зміни (рівень освітлення вдень і вночі) або зміни сценаріїв у сцені (наприклад, яскраве світло від ліхтарів автомобіля або потяга, що рухається). Зображення, зняті в таких умовах, характеризуються спотворенням контрасту і низькою інтенсивністю освітлення як усього зображення, так і окремих його ділянок. Вони також мають вузький динамічний діапазон і сильний шум.

Більшість цифрових відеокамер не призначені для знімання відео за різних умов навколишнього середовища [2]. Через це відзняті відео стають непридатними для використання в багатьох застосунках, зокрема в тих, що працюють в режимі реального часу. У разі низької якості отриманих зображень або відео єдиним засобом підвищення ефективності застосунків, що використовують ці дані, є покращення відзнятих матеріалів.

Покращення відео є одним з найважливіших і складних компонентів системи відеоспостереження. Оскільки кількість здійснюваних операцій збільшується вночі, в умовах з низьким освітленням або з непередбачуваним режимом змін освітлення через часові (день/ніч), погодні (хмари, туман) чи ситуаційні умови (наприклад, поява джерел освітлення сцени уваги — ліхтарів автомобілів чи потягів) тощо, потрібно більше деталей та інтегрованої інформації з покращеного

зображення, а процес розуміння зображення та відео сцени уваги потребує більше деталей. Проте низькоякісне відео від більшості камер спостереження не є задовільним, і це становить велику проблему для повноцінного та якісного прийняття рішення стосовно ситуації у сцені, оскільки через погане освітлення бракує контексту навколишньої сцени уваги. Щоб прийняти адекватне і єдине правильне рішення, потрібно розв'язати цю проблему на етапі захоплення (capture) чи попереднього оброблення відео шляхом його покращення.

Потреба в успішному розв'язанні задачі отримання якісних даних як початкової ланки всього процесу оброблення зображень зростає через те, що в системах відеоаналітики передбачено максимальне усунення людини від процесу збору та оброблення отриманих зображень. Це зумовлено тим, що відеосистеми отримують надто великі обсяги відеоданих, які зазвичай є надлишковими, а контроль зображень і регулювання параметрів системи з боку людини-оператора є монотонними і важкими, але відповідальними завданнями. Один із варіантів розширення можливостей систем оброблення відеоінформації — це автоматичний режим функціонування, в якому людина може втручатися лише для прийняття рішень в окремих випадках на основі зображень, покращення якості яких має виконуватися також в автоматичному режимі [3, 4].

Метою цієї роботи є покращення відео для систем відеоаналітики, що дасть змогу не тільки поліпшити їхній візуальний вигляд, але і забезпечить «краще» перетворення представлення сцени для майбутнього автоматизованого оброблення відео, що передбачає такі процедури із зображеннями та відео, як аналіз сцени та виявлення, сегментація і розпізнавання об'єктів. Автоматизація виконання таких процедур дає змогу виконувати та аналізувати фонову інформацію або відомості загального характеру, які потрібні для розуміння поведінки об'єкта. Це дає змогу частково або навіть повністю виключити дорогий візуальний огляд людиною спостережуваних сцен [5, 6].

1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПОКРАЩЕННЯ ВІДЕО В СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Методи покращення відео дають змогу здійснити оброблення кадру у такий спосіб, щоб він мав кращий вигляд для людини-оператора системи відеоспостереження. Зазвичай ці методи використовують для постоброблення шляхом зміни контрасту або/та динамічного діапазону в кадрі. Метою процесу підвищення контрастності є регулювання локального контрасту в різних ділянках кадру, щоб деталі в темних або світлих його ділянках були помітні, та їх могли розпізнати як людина-оператор, так і сама система комп'ютерного зору [7, 8]. Сучасні методи посилення контрасту можна розділити на дві групи: прямі [2, 10] і непрямі [10–15]. За допомогою прямих методів визначають міру контрасту та намагаються покращити його, а шляхом застосування непрямих методів поліпшують контраст, використовуючи недостатньо задіяні ділянки динамічного діапазону без визначення конкретного рівня контрасту.

Сучасні методи покращення відео в умовах слабкого освітлення можна поділити на дві категорії. Одна категорія методів дає змогу здійснювати покращення у просторовій області, а інша — на основі трансформації. У разі покращення відео у просторовій області працюють безпосередньо з пікселями. Основна перевага цих методів полягає в тому, що вони концептуально простіші для розуміння та їхня часова складність низька, що сприяє реалізації в реальному часі. Покращення відео на основі трансформації зводиться до аналізу математичних функцій або сигналів залежно від частоти та безпосередньо впливає на коефіцієнти перетворення зображення, наприклад, перетворення Фур'є, дис-

кретного вейвлет-перетворення (DWT) і дискретного косинусного перетворення (DCT). Основна ідея використання цієї техніки полягає в тому, щоб покращити відео шляхом маніпулювання коефіцієнтами перетворення. Перевагами покращення відео на основі трансформації є низька складність обчислень і легкість перегляду та маніпулювання частотним складом зображення. До фундаментальних обмежень цієї категорії методів слід віднести неможливість одночасного покращення (до високого рівня) всіх частин зображення і складність автоматизації самої процедури покращення зображення.

Виконання покращення відео з низькою якістю є складним завданням з таких причин [5, 16–20].

- Через низький контраст відео неможливо чітко виділити рухомі об'єкти з темного фону. Більшість методів, що ґрунтуються на розпізнаванні кольору, не спрацьовують, якщо колір рухомих об'єктів і фону однакові.

- Відношення сигнал/шум зазвичай дуже низьке через високе ISO (число, яке вказує на чутливість датчиків камери до світла). Використання високого значення ISO може спричинити видимий шум на цифрових фотографіях.

- Відеосигнал є деградованою версією джерела або вихідного відеосигналу. Ці погіршення можуть бути наслідком процесів отримання даних, перетворення форматів даних, а також швидкості їхнього виконання.

- Навколишнє середовище впливає на те, як люди сприймають і розуміють все те, що трапляється навколо: у нічному відео важко працювати з рухомими об'єктами в кадрі, з туманом, дощем, поведінкою людей, оскільки кадрам бракує фонового контексту через погане освітлення.

- Потрібно підтримувати міжкадрову когерентність або стикування, тобто підтримувати такий стан у відео, коли ділянки з рухомими об'єктами в послідовних зображеннях відеопослідовності змінюються плавно.

- Один піксель із зображення низької якості може бути важливим, навіть якщо локальна різниця невелика, наприклад, як ділянка між фарами та задніми ліхтарями автомобіля, що рухається в відео.

- Низька якість використовуваного відеопристрою та відсутність досвіду оператора.

2. ПОКРАЩЕННЯ КАДРІВ ВІДЕО НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ГАММА-КОРЕКЦІЇ

Відео — це фактично послідовність зображень (кожне зображення у відеопослідовності називають кадром), які відображаються з частотою, достатньою для того, щоб людське око могло сприймати безперервність його вмісту. У разі потреби покращення відео відповідні методи й алгоритми застосовують до кожного кадру цієї послідовності. Єдиною вимогою під час виконання процедури покращення відео є постійне підтримання тієї міжкадрової когерентності, або стикування, яка була в оригінальній відеопослідовності. Приклад збереження міжкадрової когерентності спостерігається зокрема тоді, коли ділянки кадрів відео з рухомими об'єктами у послідовних зображеннях плавно змінюються. Інакше кажучи, покращення відео шляхом покадрового оброблення повинно зберігати плавність переходів в освітленні, у зміні кольорів тощо. Порушення цієї вимоги може призвести до різких і неузгоджених змін у контексті відео.

Покращення зображень та відео є одним з етапів попереднього оброблення зображень. Результати цього покращення суттєво впливають на якість усіх наступних етапів конвеєра оброблення аж до кінцевого результату — повного розуміння сцени. Особливо це впливає на оброблення відео. Якщо звичайні ори-

гінальні відео зберігають міжкадрову когерентність впродовж всього часу існування, а алгоритм покращення вносить певні «побічні» артефакти в оброблені кадри, то на наступному етапі конвеєра оброблення може статися певний збій у забезпеченні міжкадрової когерентності, яка у процедурі покращення відео набуває чи не найважливішого значення.

У роботі [21] запропоновано ефективний метод покращення зображень на основі застосування гамма-корекції, який не додає будь-яких сторонніх артефактів до покращеного зображення. Методи на основі гамма-корекції довели свою високу ефективність [21, 22] і водночас мають низьку обчислювальну складність. Гамма-корекція ефективно відображає властивості зорової системи людини [23]. Її широко застосовують як один із варіантів модифікації гистограми для підвищення контрастності зображення шляхом рівномірного розподілу рівнів сірого [24, 25] завдяки простому регулюванню та ефективній реалізації.

Для застосування методу не потрібні ані знання про використовувані камери (модель, налаштування тощо), ані геометричне калібрування. Ним можна скористатися в разі значних варіацій точки огляду та освітлення сцени. У [8, 21] запропоновано методику оцінювання оптимальної величини гамма-корекції в автоматичному режимі для систем відеоаналітики, спостереження та інших застосунків в умовах імовірних змін освітлення сцени через погодні умови, часові зміни або зміни у сценарії сцени. У цьому режимі виключено пряме втручання людини у процес підбору цього параметра.

2.1. Гамма-корекція зображень. Методи гамма-корекції складають сімейство загальних методів модифікації гистограм, отриманих просто за допомогою змінного адаптивного параметра γ (гамма).

Відомо, що найбільшу проблему для автоматизованих систем оброблення відеоінформації створює режим освітлення сцени. Це означає, що якість зображень на вході відеосистеми залежить безпосередньо від освітлення і ситуації у сцені, що робить освітлення сцени уваги практично неконтрольованим і непередбачуваним процесом. Через непрогнозовані зміни в освітленні зображення на вході системи стають більш темними або навпаки занадто світлими. Гистограми зображень у цьому разі також змінюють свій вигляд. У разі зміни освітлення більшість стовпців гистограми зміщується в бік мінімальних значень (що свідчить про зростання кількості пікселів, які відображають більш темний рівень освітлення) або в бік максимальних значень (що свідчить про зростання кількості пікселів, які відображають більш світлий рівень освітлення) шкали рівнів освітлення.

Також можна інтуїтивно зрозуміти, що в результаті покращення зображення має підвищитися контрастність та інтенсивність країв, а також буде забезпечено збереження локальної та глобальної інформації. Результати моделювання (рис. 1) впливу значення параметра γ на якість зображення/кадру за допомогою розробленого програмного забезпечення доводять, що:

- 1) якість зображення/кадру змінюється залежно від значення параметра γ , а отже, і розподілу рівнів яскравості вздовж шкали від 0 до 255;
- 2) контрастність зображення/кадру напряму залежить від ширини діапазону розподілу рівнів яскравості: чим ширшим є діапазон розподілу рівнів яскравості, тим чіткіше виражені контури об'єктів;
- 3) контраст об'єктів у зображенні/кадрі безпосередньо відображає міру виявлення (і, отже, розпізнавання) об'єкта на якому-небудь тлі, а також можливості визначення контурів об'єктів, наприклад, за допомогою детектора країв Canny.

Результати досліджень, проведених на розробленій програмній моделі з використанням відомих і перевірених алгоритмів виявлення характерних або ключових точок, як-от: SIFT, SURF, FAST та ORB, довели вплив параметра γ на

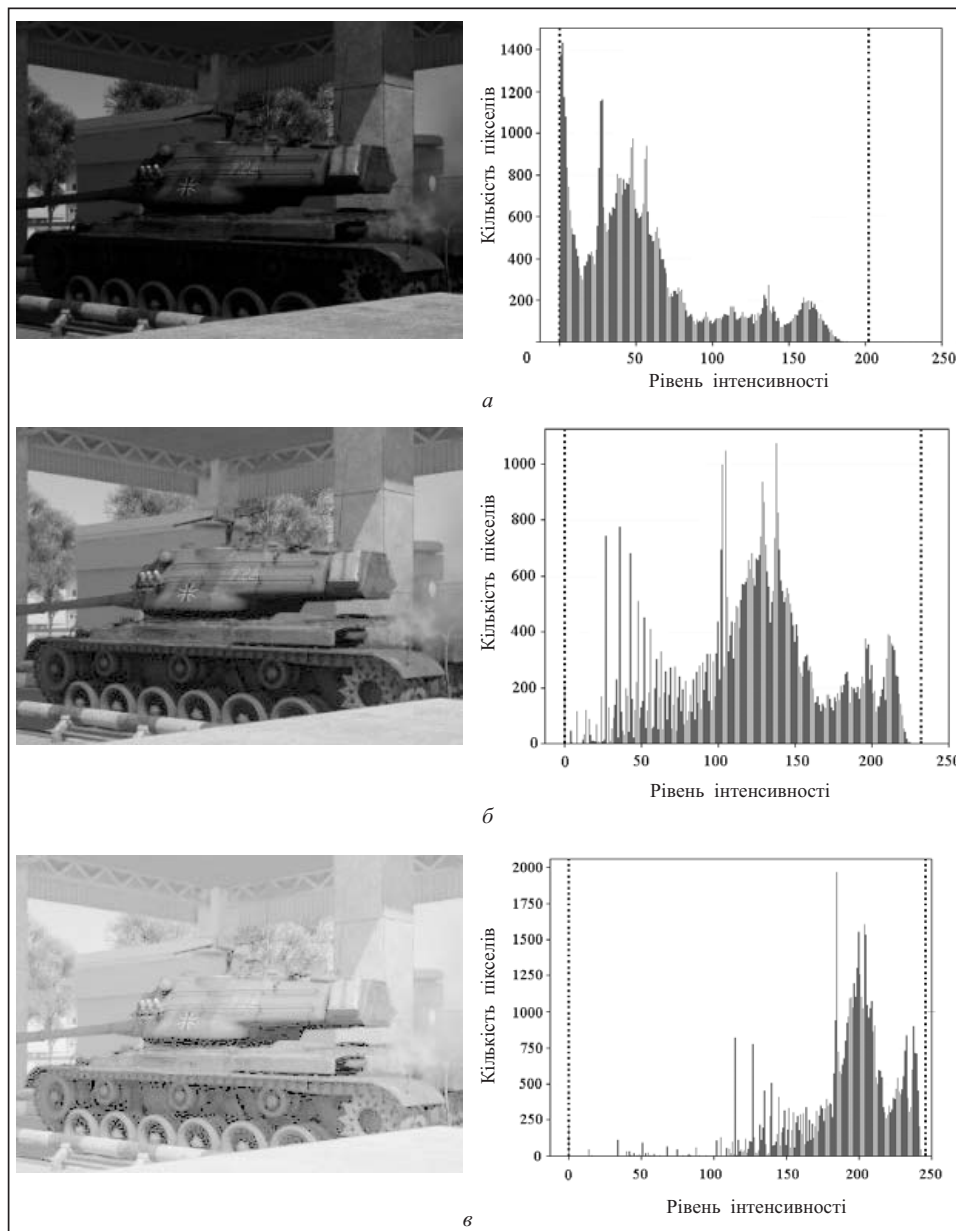


Рис. 1. Зображення «Tank» і його гістограми: оригінальне зображення для $\gamma = 1$ (а); зображення для $\gamma = 2.5$ (б); зображення для $\gamma = 7.0$ (в) [21]

якість зображення. Отримані позитивні результати дослідження статистичних характеристик зображень та наявність візуального покращення підтверджують те, що підхід до покращення зображень вибрано правильно. До цього слід додати результати досліджень, що визначають, як змінюється здатність системи відеоаналітики до виявлення об'єктів у сцені уваги після застосування запропонованого підходу до покращення зображень. Відомо, що здатність системи відеоаналітики до виявлення, виділення та супроводу об'єктів залежить від виявлення стійких ключових точок, які є ознаками певних об'єктів. Ці ознаки об'єктів визначають за допомогою відомих і перевірених алгоритмів виявлення характерних або ключових точок. На рис. 2 на прикладі відомого алгоритму SIFT показано, як змінюється кількість ключових точок у зображенні залежно від за-

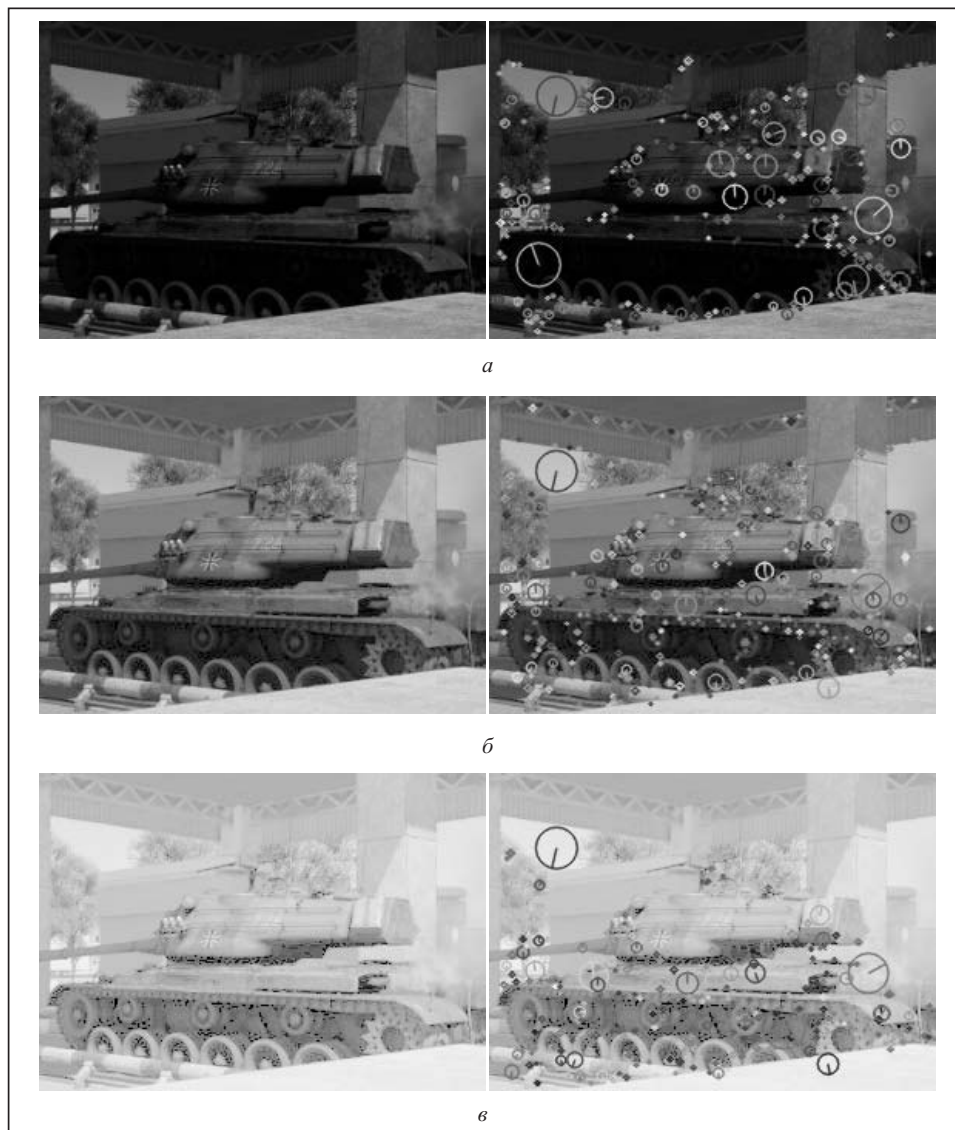


Рис. 2. Зображення «Tank» і ключові точки, виявлені алгоритмом SIFT: оригінальне зображення для $\gamma = 1$ (а); зображення для $\gamma = 2.5$ (б); зображення для $\gamma = 7.0$ (в)

стосування гамма-корекції для покращення зображення. Видно, що змінюється не тільки якість самого зображення залежно від значення параметра γ , а й кількість ключових точок на зображенні та їхнє розташування по площині зображення. Навіть не аналізуючи якість отриманих ознак, можна стверджувати, що більш рівномірне розосередження ознак по всьому полю зображення свідчить про те, що для такого зображення можливість виявлення об'єктів у сцені уваги суттєво зростає. Подібна закономірність зберігається у разі застосування таких методів визначення ключових точок, як FAST і ORB.

2.2. Гамма-корекція та гістограма зображення. Проведені дослідження доводять, що у разі зміни параметра γ від мінімального (рис. 1, а) значення до максимального (рис. 1, в) серед всього набору зображень для різних значень параметра γ існує лише одне зображення, що відповідає найкращій якості. При цьому параметр γ є оптимальним у тому сенсі, що він забезпечує максимальне для цього зображення розосередження рівнів інтенсивності (рис. 2, в). Теоретично, є можливим «іде-

альне» зображення. Вочевидь в отриманому наборі зображень «ідеальним» може бути лише одне зображення, в якому усі значення ймовірності появи кожного з його рівнів інтенсивності мають однакове значення.

Дослідження, описані в [21], доводять, що таке «ідеальне» зображення відрізняється тим, що ймовірності появи всіх рівнів інтенсивності у зображенні однакові, а ентропія зображення, яка характеризує змінність рівнів інтенсивності, набуває максимального значення.

Наведене вище свідчить про те, що «ідеальним» буде зображення з такими даними: всі рівні інтенсивності мають однакову ймовірність появи і гістограма зображення займає всю ширину шкали яскравості від 0 до 255. Функція ймовірності такого зображення набуває кусково лінійного вигляду з 256 інтервалами (за кількістю рівнів яскравості) від 0 до 1.0 (або від 0 до загальної кількості пікселів у зображенні без нормалізації). Цей висновок дає підстави вважати зображення з визначеними вище даними «ідеальним» зразком-зображенням для зіставлення зображень, скоригованих завдяки застосуванню гамма-корекції з відповідним параметром γ . Кумулятивна гістограма такого «ідеального» зразка-зображення — це графік у формі висхідних сходів з 256 (за кількістю рівнів інтенсивності) сходинками. Апроксимація значень кумулятивної гістограми «ідеального» зразка-зображення перетворює кумулятивну гістограму у пряму лінію з координатами (0, 0), (1, 255) (рис. 3) або «лінію ідентичності» (далі на рисунках позначено пунктирною лінією) [26].

На рис. 3 відображено зміну вигляду кумулятивної гістограми зображення після коригування. Аналіз гістограм зображень показує, що кориговане зображення з відповідним параметром γ має найкращий вигляд для візуального представлення тоді, коли його кумулятивна гістограма максимально наближена до кумулятивної гістограми «ідеального» зразка-зображення. Оцінити ступінь цієї наближеності можна, застосовуючи середньоквадратичне відхилення MSE кумулятивної гістограми коригованого зображення від подібної гістограми «ідеального» зразка-зображення за кожним рівнем інтенсивності:

$$MSE = \frac{1}{256} \sum_{k=0}^{L-1} [C(k) - Cdf(k)]^2, \quad (1)$$

де $C(k)$ і $Cdf(k)$ — відповідно нормалізовані значення кумулятивної гістограми «ідеального» зображення і кумулятивної гістограми коригованого зображення k -го рівня інтенсивності.

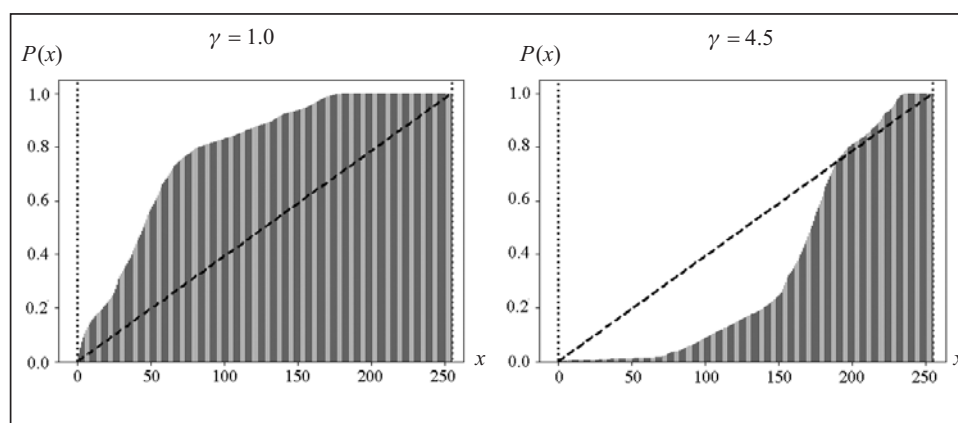


Рис. 3. Зразки кумулятивної гістограми (нормалізовані по осі y) коригованих зображень та полігон функції ймовірності «ідеального» зображення-зразка «Tank» [21]

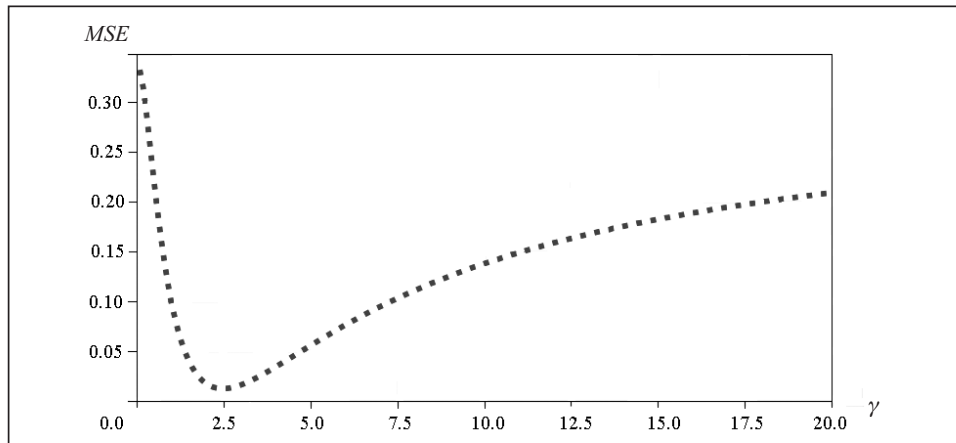


Рис. 4. Графік залежності MSE від параметра γ на прикладі зображення «Tank» [21]

Отже, визначивши мінімальне значення MSE для певного значення параметра γ , можна стверджувати, що це значення параметра γ є оптимальним (γ_{opt}) і забезпечує максимальне наближення розподілу значень рівнів інтенсивності зображення до лінії ідентичності «ідеального» зразка-зображення для $\gamma_{opt} = 2.5$ (рис. 4).

Визначення оптимального значення параметра γ_{opt} запропонованим способом дає можливість коригувати якість зображень, які надходять у вузол оброблення системи відеоаналітики, причому в автоматичному режимі і без втручання людини.

2.3. Алгоритм покращення відеопослідовності на основі гамма-корекції. Для застосування методу покращення зображень з автоматизованим вибором оптимального значення параметра γ_{opt} до покращення відео слід акцентувати увагу на отриманих у роботі [7] висновках:

- оптимальне значення параметра γ , для якого зображення має найбільшу якість, знаходиться в діапазоні $\gamma_{min} < \gamma_{opt} < \gamma_{max}$;
- є лише одне оптимальне за якістю зображення для γ_{opt} , воно до максимальної міри наближене до «ідеального» зображення;
- якщо за міру наближення за якістю до «ідеального» зображення вибрати середньоквадратичне відхилення MSE (1) кумулятивної гістограми коригованого зображення від подібної гістограми «ідеального» зображення за кожним рівнем інтенсивності, то функція $MSE = f(\gamma)$ є гладкою з єдиним мінімальним значенням (рис. 4).

Процедура покращення відеопослідовності полягає у здійсненні оброблення послідовних кадрів однакового формату за допомогою єдиного для всіх кадрів алгоритму незалежно від контексту кадру. Навіть такі явища, як зміни у сцені (наприклад, спалахи блискавки, вибухи, увімкнення світла тощо), які людина сприймає як раптові, не повинні після покращення відео призводити до порушення міжкадрової когерентності. Для визначення найкращого за якістю зображення потрібно для кожного кадру відео провести певне число обчислень середньоквадратичного відхилення MSE (1) кумулятивної гістограми коригованого зображення від подібної гістограми «ідеального» зразка-зображення

$$K = \frac{\gamma_{max} - \gamma_{min}}{\Delta\gamma}, \quad (2)$$

де γ_{max} , γ_{min} і $\Delta\gamma$ — відповідно значення параметра γ , що визначають його розкид від максимального до мінімального значення для всієї відеопослідов-

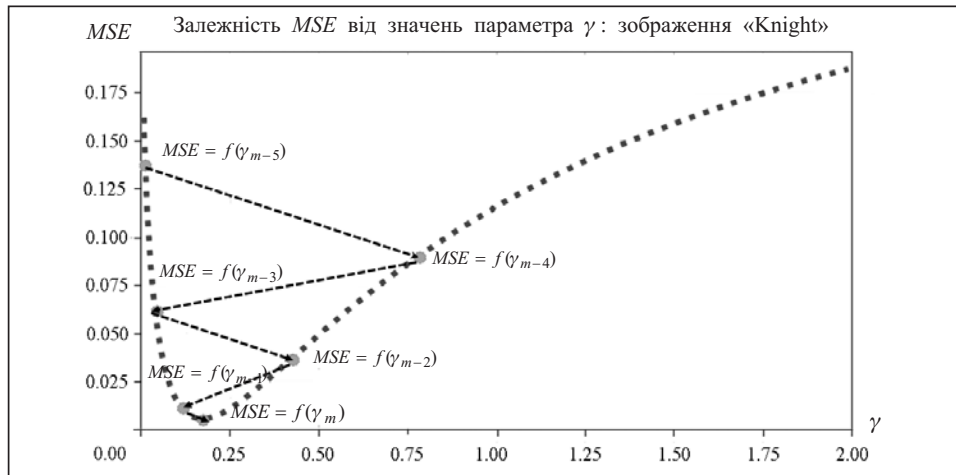


Рис. 5. Приклад послідовності пошуку оптимального значення параметра γ для визначення найкращого за якістю зображення на графіку $MSE = f(\gamma)$ від точки $MSE = f(\gamma_{m-5})$ до точки $MSE = f(\gamma_m)$

ності, та інтервал параметра γ , від якого залежить точність визначення його оптимального значення.

Отримані висновки та аналіз графіка залежності середньоквадратичного відхилення $MSE = f(\gamma)$ (1) кумулятивної гістограми коригованого зображення від подібної гістограми «ідеального» зразка-зображення залежно від значення параметра γ дають підстави стверджувати, що для пошуку оптимального значення параметра γ можна використовувати відомий у машинному навчанні метод градієнтного спуску. Однак у разі застосування цього методу до пошуку оптимального (у цьому випадку мінімального значення $MSE = f(\gamma)$) параметра γ будуть наявні недоліки, притаманні методу градієнтного спуску, а саме залежність швидкості збіжності методу до кінцевого результату від вибору інтервалу $\Delta\gamma$ для обчислень $MSE = f(\gamma)$ (рис. 5).

Адже за такого підходу до пошуку мінімального значення функції $MSE = f(\gamma)$ для кожного кадру відео потрібно обчислювати $MSE = f(\gamma)$ для всіх значень параметра γ від $\gamma_{\min}$ до $\gamma_{\max}$ з інтервалом $\Delta\gamma$, переймаючись при цьому вибором параметрів, що визначають збіжність методу пошуку мінімуму функції.

У цій роботі запропоновано більш ефективний підхід до пошуку оптимального параметра γ в кадрах відеопослідовності, який містить два основні етапи.

Етап 1 полягає у визначенні оптимального параметра γ в першому кадрі відеопослідовності. Його можна визначити, застосувавши розглянутий метод до окремого зображення. У загальному випадку оптимальне значення параметра γ для першого кадру відео можна знайти, виконуючи K обчислень (2) значення $MSE = f(\gamma)$ для всіх значень параметра γ від $\gamma_{\min}$ до $\gamma_{\max}$ з інтервалом $\Delta\gamma$, які можуть бути відомі *a priori*. Однак цей варіант може призвести до надлишкових обчислень.

Аналіз проведених експериментів дає змогу спростити процес пошуку оптимального значення параметра γ . Аналізуючи рис. 6, можна дійти висновку про таку поведінку функції $MSE = f(\gamma)$:

$$f(\gamma_k) > f(\gamma_{k+1}) \text{ в діапазоні } \gamma_{\min} > \gamma > \gamma_{\text{opt}}.$$

Отримане раніше свідчення того, що є лише одне найкраще за якістю зображення, дає змогу дійти висновку про таке: щойно функція $MSE = f(\gamma)$ досяг-

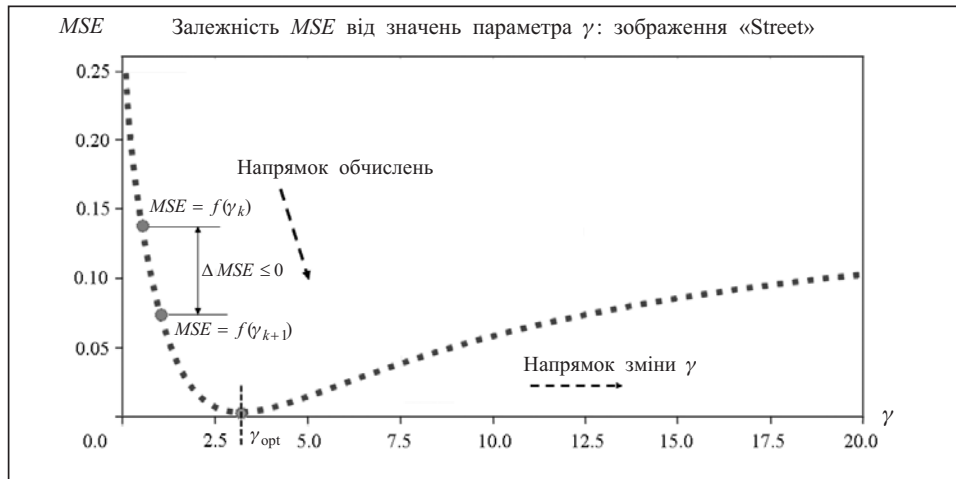


Рис. 6. Приклад поведінки функції $MSE = f(\gamma)$ у діапазоні $\gamma_{\min} > \gamma > \gamma_{\text{opt}}$

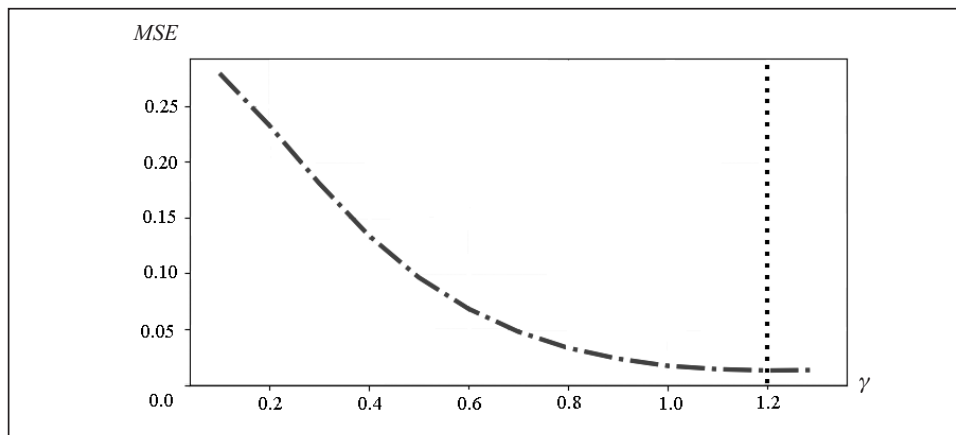


Рис. 7. Приклад ділянки графіка функції $MSE = f(\gamma)$ у діапазоні $\gamma_{\min} > \gamma > \gamma_{\text{opt}}$, яка потребує обчислення для визначення оптимального значення параметра γ (точковою вертикальною лінією позначено γ_{opt})

не умови, коли $f(\gamma_{i+1}) > f(\gamma_i)$, можна стверджувати, що $\gamma_i = \gamma_{\text{opt}}$. Тоді потреба у подальшому обчисленні значень функції $MSE = f(\gamma)$ зникає і кількість обчислень значень функції $MSE = f(\gamma)$ для першого кадру відеопослідовності суттєво знижується (рис. 7):

$$K = \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\text{opt}}}{\Delta\gamma} + 1. \quad (3)$$

Етап 2 алгоритму зводиться до автоматичного визначення оптимального значення параметра γ усіх наступних кадрів відеопослідовності, починаючи з другого. В основі реалізації цього етапу лежить твердження про наявність в оригінальній відеопослідовності міжкадрової когерентності, що свідчить про високий рівень кореляції між контентом сусідніх кадрів. Це у свою чергу дає право стверджувати, що різниця між значеннями оптимального параметра γ двох сусідніх кадрів j та $(j+1)$ послідовності є незначною. Чим менша різниця між цими значеннями сусідніх кадрів, тим менше обчислень доведеться робити для пошуку оптимального параметра γ сусідніх кадрів.

Для обох кадрів (#0012 та #0013) на рис. 8 значення γ_{opt} однакове і становить 1.2. На рис. 9, а та 9, б значення γ_{opt} є різними. Для кадру #0154 це значення становить 1.4, а для кадру #0155 — 1.3. На рис. 10 наведено пари кадрів (#0012–0013 та

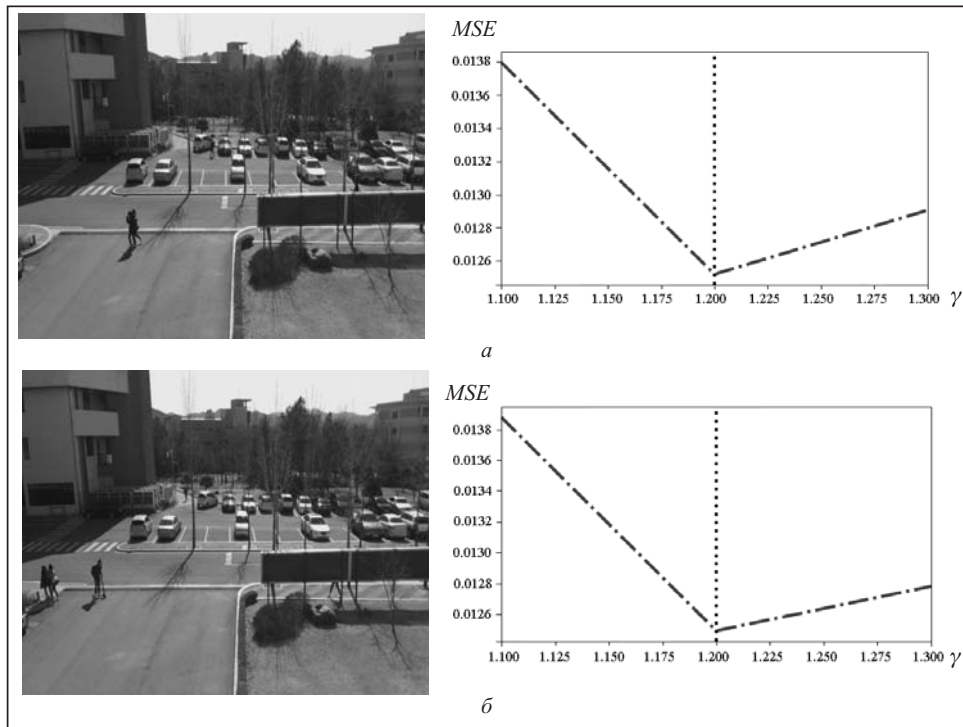


Рис. 8. Приклад сусідніх кадрів (#0012 та #0013) оригінального тестового відео «Test» (a) та відповідної ділянки графіків функції $MSE = f(\gamma)$ (б) навколо оптимального значення параметра γ_{opt} (виділено точковою вертикальною лінією)

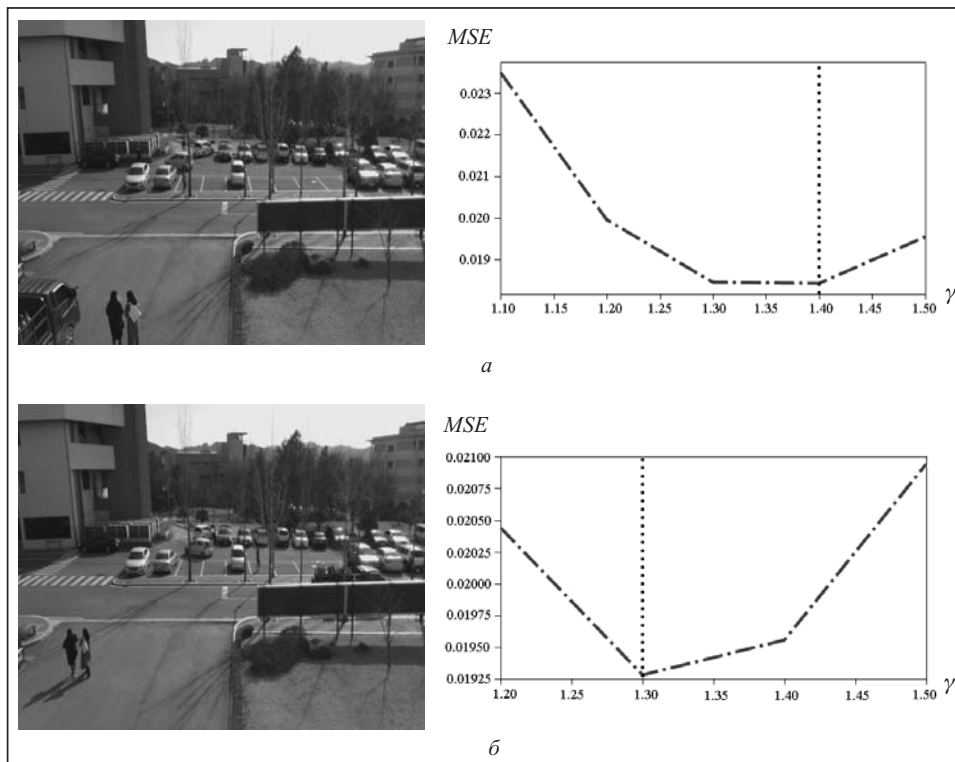


Рис. 9. Приклад сусідніх кадрів #0154 (a) та #0155 (б) оригінального тестового відео «Test» та відповідної ділянки графіків функції $MSE = f(\gamma)$ навколо оптимального значення параметра γ_{opt} (виділено точковою вертикальною лінією)



#0012



#0013



#0154



#0155

Рис. 10. Приклад двох пар сусідніх кадрів (#0012–0013 та #0154–0155) оригінальної (ліворуч) та покращеної (праворуч) тестових відеопослідовностей «Test»

#0154–0155) оригінальної (ліворуч) та покращеної (праворуч) тестових послідовностей. Хоча ці кадри не є складними у сенсі освітлення, але все-таки видно, що світліші плями кадрів стають темнішими, а темні — світлішими.

Для першого кадру відеопослідовності мінімальне значення параметра $\gamma_{\min}$ та $\Delta\gamma$ визначають на основі попередньо встановленої інформації. Проте для визначення оптимального значення параметра наступних кадрів потрібно ввести таке поняття, як «вхідне» значення параметра γ . Це зумовлено тим, що між сусідніми кадрами послідовності є значна кореляція. Тоді, як початкове значення параметра γ (для першого кадру це $\gamma_{\min}$) для обчислення функції $MSE = f(\gamma)$ поточного кадру j вибираємо оптимальне значення параметра γ попереднього кадру ($j-1$), а саме $\gamma_{\text{opt}}^{j-1}$. Це і є «вхідне» значення параметра γ .

Отже, у раніше наведених прикладах для кадрів #0012 і #0013 (рис. 8, а та 8, б відповідно) це значення дорівнює 1.2, для кадру #0154 (рис. 9, а) — 1.4. Для кадру #0155 (рис. 9, б) «вхідне» значення параметра γ становитиме 1.3. Тепер залишається лише одне питання, на яке потрібно дати відповідь: на якій ділянці графіка $MSE = f(\gamma)$ буде знаходитися стартова точка $MSE = f(\gamma_{\text{opt}}^{j-1})$: на спадній, як $MSE = f(\gamma_k^j)$, на рис. 11, а, або на висхідній, як $MSE = f(\gamma_n^j)$, на рис. 11, б, де нижні індекси k та n — номери ітерації. З усього зазначеного випливає таке:

- якщо $\Delta MSE = f(\gamma_{k+1}^j) - f(\gamma_k^j) \leq 0$, де $f(\gamma_k^j) = f(\gamma_{\text{opt}}^{j-1})$, а $f(\gamma_{k+1}^j) = f(\gamma_k^j) + \Delta\gamma = f(\gamma_{\text{opt}}^{j-1}) + \Delta\gamma$, то це означає, що з кожною ітерацією в напрямку

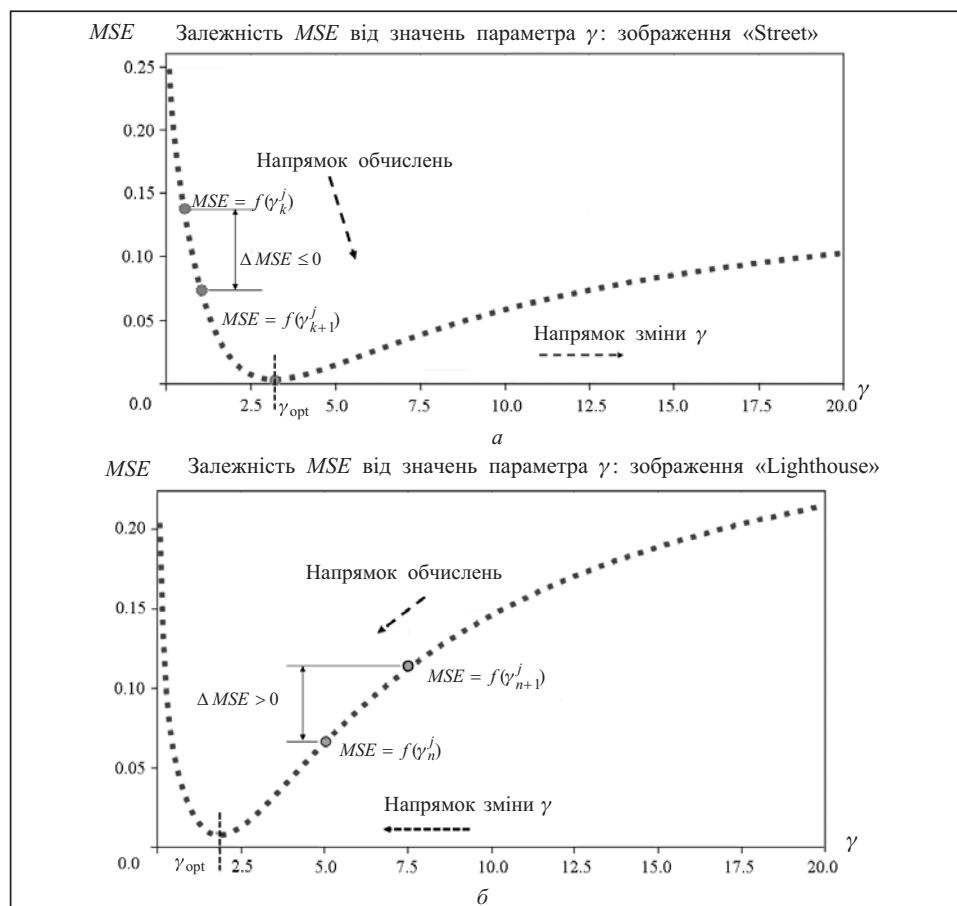


Рис. 11. Ілюстрація ітераційного пошуку оптимального значення параметра γ , починаючи з «вхідного» значення параметра γ

збільшення параметра γ процес обчислення оптимального параметра γ наближається до завершення (рис. 11, а);

- якщо $\Delta MSE = f(\gamma_{n+1}^j) - f(\gamma_n^j) > 0$, де $f(\gamma_n^j) = f(\gamma_{opt}^{j-1})$, а $f(\gamma_{n+1}^j) = f(\gamma_n^j) + \Delta\gamma = f(\gamma_{opt}^{j-1}) + \Delta\gamma$, то це означає, що з кожною ітерацією в напрямку збільшення параметра γ процес обчислення оптимального параметра γ віддаляється від завершення (рис. 11, б), і тоді напрямок зміни цього параметра потрібно змінювати на протилежний, тобто з кожною наступною ітерацією значення цього параметра має зменшуватися.

Запропонований підхід до обчислення оптимального значення параметра γ з використанням «вхідного» значення параметра γ суттєво зменшує обсяги обчислень.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для проведення експериментів вибрано відео [27] з багатьма проблемами в освітленні (окремі місця дуже затемнені у разі яскравого освітлення всього поля зображення в нічний час за великої кількості світлих плям від ліхтарів тощо).

На рис. 12, а та рис. 12, б представлено зображення кадру #1053 «картинка в картинці». Загальний вигляд сцени уваги наведено на знімку ліворуч знизу, де білими прямокутниками виділено ділянки, які є складними для розуміння сцени уваги як людиною-оператором, так і системою відеоспостереження. Інші три чверті зображення — збільшені виділені ділянки зони відповідальності відеокamera. Оптимальний параметр γ для покращеного кадру послідовності становить 1.5. Через широкий динамічний діапазон кадру ускладнено розуміння виділених прямокутниками ділянок кадру. Лише завдяки застосуванню пропо-



Рис. 12. Кадр #1053 тестової відеопослідовності: оригінальної (а), покращеної (б) [27]



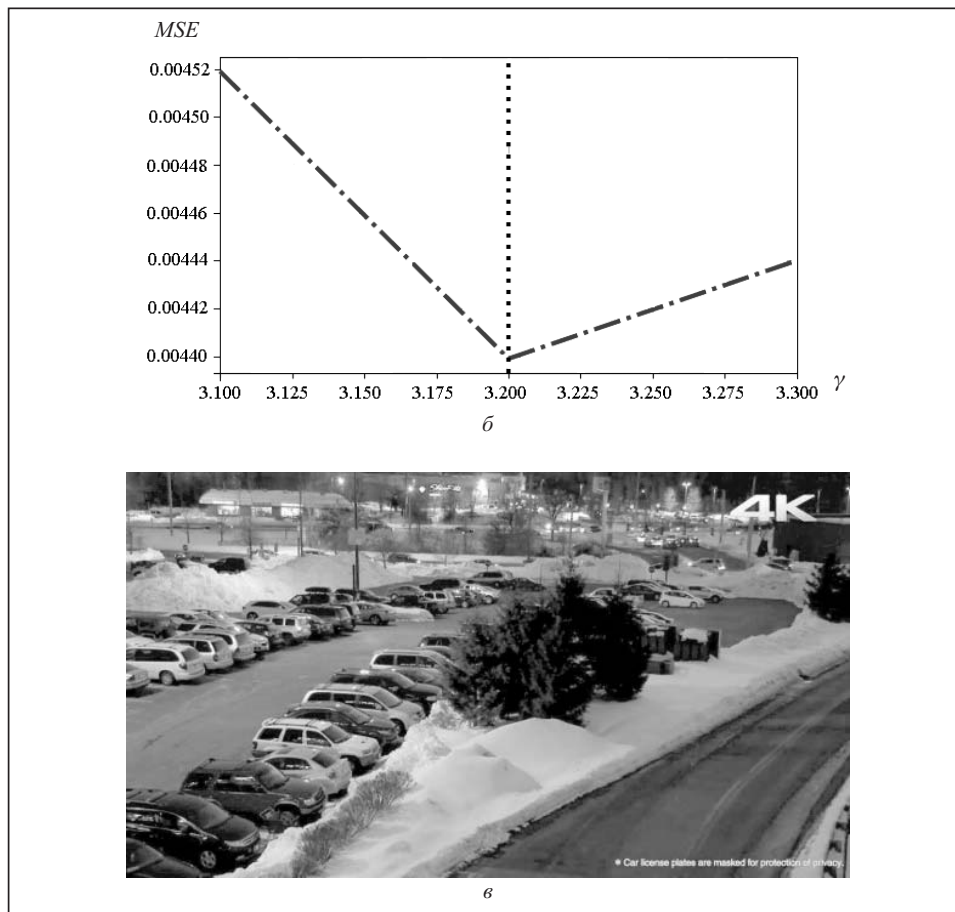


Рис. 13. Приклад покращення одного з кадрів (#2930) відео сцени у вечірній час з великою кількістю рухомих автомобілів з увімкненими фарами, ліхтарів, світлової реклами: оригінальний кадр сцени (а), ділянка функції $MSE = f(\gamma_{opt}^{j-1})$ навколо оптимального параметра γ (б), покращений кадр (в) [27]

нованого методу покращення надто темні ділянки стають світлішими і, як результат, більш доступними для розпізнавання. На рис.13 наведено приклад покращення одного зі складних (з огляду на складність алгоритмів оброблення сцени) кадрів (#2930) тестового відео. Складність наведеного кадру відео зумовлена тим, що тестове відео відзнято у вечірній час, з великою кількістю рухомих об'єктів з яскравими світовими плямами (автомобілі з увімкненими фарами, ліхтарі, світлова реклама) і має широкий динамічний діапазон.

ВИСНОВКИ

Розроблений метод покращення відеопослідовності ґрунтується на визначенні оптимального значення параметра γ в автоматичному режимі. У [21] доведено, що у разі застосування гамма-корекції оптимальне значення параметра γ дає змогу отримати зображення, у якого такі характеристики, як якість у сенсі візуалізації, рівень контрастності, здатність до виявлення контурів об'єктів, наявних у зображенні тощо, є максимальними. Процедура покращення відеопослідовності являє собою оброблення послідовних кадрів однакового формату за допомогою єдиного для всіх кадрів алгоритму незалежно від контексту кадру з обов'язковим збереженням міжкадрової когерентності впродовж всього відео.

Метод забезпечує підвищення якості кожного кадру до максимально можливого рівня в автоматичному режимі. Він має елементи оперативної адаптивності до

різких змін в освітленні сцени, що, завдяки високій ефективності дає змогу застосовувати його для оброблення широкого спектру відео, навіть у режимі реального часу.

Запропонований метод дає змогу суттєво покращити відеопослідовність з широким динамічним діапазоном: темні ділянки кадрів стають світлішими з одночасним збереженням природних оригінальних кольорів об'єктів у сцені і, на відміну від випадків застосування методів лінійного розтягування контрасту та глобального вирівнювання гістограми, не вносять жодних небажаних артефактів.

Розроблений інструментарій визначення в автоматичному режимі оптимального значення параметра γ , а отже, найкращого зображення для візуалізації та подальшого оброблення, суттєво підвищує ефективність систем відеоаналітики, процесів сегментації та оброблення зображень і відео завдяки зниженню негативного впливу режиму освітлення сцени на якість зображень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головін О. Аналіз натовпу людей із застосуванням методів комп'ютерного зору. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи. Зб. наук. праць*. Ін-т кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Київ, 2019. Вип. 18. С. 45–57.
2. Dong X., Wang G., Pang Y., Li W., Wen J., Meng W., Lu Y. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video. *Proc. SIGGRAPH 2010* (26–30 July 2010, Los Angeles, CA, USA). Los Angeles, 2010. P. 1–6. <https://doi.org/10.1145/1836845.1836920>.
3. Головин А. Обеспечение качества услуг в мультимедийных сетях с интеллектуальными видеокамерами. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. № 14. С. 151–160.
4. Gubarev V.F., Boyun V.P., Melnichuk S.V., Salnikov N.N., Simakov V.A., Godunok L.A., Komisarenko V.I., Dobrovolsky V.Yu., Derkach S.V., Matviyenko S.A. Using vision systems for determining the parameters of relative motion of spacecrafts. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48, N 11. P. 23–39. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v48.i11.30>.
5. Wan T., George T., Panagiotis T., Nishan C., Alin A. Context enhancement through image fusion: a multi-resolution approach based on convolution of Cauchy distributions. *Proc. 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (31 March – 04 April 2008, Las Vegas, NV, USA). Las Vegas, 2008. P. 1309–1312. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2008.4517858>.
6. Опанасенко В.М., Фазилов Ш.Х., Раджабов С.С., Кахаров Ш.С. Багаторівнева система розпізнавання обличчя. *Кібернетика та системний аналіз*. 2024. Т. 60, № 1. С. 175–181. <https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664.24.1.15>.
7. Ali W.S.I. Real time video sharpness enhancement by wavelet-based luminance transient improvement. *Proc 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications* (12–15 February 2007, Sharjah, United Arab Emirates). Sharjah, 2007. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISSPA.2007.4555337>.
8. Golovin O. Computer-aided selection of the optimal gamma correction parameter for image enhancement in video analytics systems. *Proc. 11th IEEE Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (22–25 September 2021, Cracow, Poland). Cracow, 2021. Vol. 2. P. 148–155. <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660869>.
9. Chen S.D., Ramli A.R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement. *IEEE Trans. Consumer Electronic*. 2003. Vol. 49, N 4. P. 1310–1319. <https://doi.org/10.1109/TCE.2003.1261234>.
10. Rao Y., Chen L. An efficient contourlet-transform-based algorithm for video enhancement. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. 2011. Vol. 2, N 3. P. 282–293.
11. Du S., Ward R.K. Adaptive region-based image enhancement method for robust face recognition under variable illumination conditions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2010. Vol. 20, Iss. 9. P. 1165–1175. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2010.2045817>.
12. Wadud A.A., Kabir M., Dewan M.H., Oksam M.C. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement. *IEEE Trans. Consumer Electronic*. 2007. Vol. 53, N 2. P. 593–600. <https://doi.org/10.1109/TCE.2007.381734>.
13. Stark J.A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Processing*. 2000. Vol. 9, N 5. P. 889–896. <https://doi.org/10.1109/83.841534>.

14. Polesel A., Ramponi G., Mathews V.J. Image enhancement via adaptive unsharp masking. *IEEE Trans. Image Processing*. 2000. Vol. 9, N 3. P. 505–510. <https://doi.org/10.1109/83.826787>.
15. Kim J.Y., Kim L.S., Hwang S.H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub block histogram equalization. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*. 2001. Vol. 11, N 4. P. 475–484. <https://doi.org/10.1109/76.915354>.
16. Rao Y., Lin W., Chen L.T. Image-based fusion for video enhancement of nighttime surveillance. *Optical Engineering Letters*. 2010. Vol. 49, N 2. P. 120501-1–120501-3. <https://doi.org/10.1117/1.3520553>.
17. Ilie A., Raskar R., Yu J. Gradient domain context enhancement for fixed cameras. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2005. Vol. 19, N 4. P. 533–549. <https://doi.org/10.1142/S0218001405004137>.
18. Cai Y., Huang K., Tan T., Wang Y. Context enhancement of nighttime surveillance by image fusion. *Proc. IEEE 8th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)* (20–24 August 2006, Hong Kong, China). Hong Kong, 2006. P. 980–983. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2006.410>.
19. Li J., Li S.Z., Pan Q., Yang T. Illumination and motion-based video enhancement for night surveillance. *Proc. 2005 IEEE International Workshop on Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance* (15–16 October 2005, Beijing, China). Beijing, 2005. P. 169–175. <https://doi.org/10.1109/VSPETS.2005.1570912>.
20. Li J., Tao Y., Quan P., Cheng Y. Combining scene model and fusion for night video enhancement. *Journal of Electronics*. 2009. Vol. 26, N 1. P. 88–93. <https://doi.org/10.1007/s11767-007-0052-x>.
21. Golovin O. Image enhancement in video analytics systems. *Control Systems and Computers*. 2020. N 6. P. 3–20. <https://doi.org/10.15407/csc.2020.06.003>.
22. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. Boston: Addison-Wesley, 2008.
23. Boyun V.P., Voznenko L.O., Malkush I.F. Principles of organization of the human eye retina and their use in computer vision systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 5. P. 701–713. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00181-0>.
24. Kaur M., Kaur J. Survey of contrast enhancement techniques based on histogram equalization. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2011. Vol. 2, N 7. P. 137–141. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2011.020721>.
25. Arici T., Dikbas S., Altunbasak Y. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement. *IEEE Trans. Image Process.* 2009. Vol. 18, N 9. P. 1921–1935. <https://doi.org/10.1109/TIP.2009.2021548>.
26. Bertalmío M. Vision Models for High Dynamic Range and Wide Color Gamut Imaging: Techniques and Applications. New York: Academic Press, 2019. 315 p.
27. Video demo Cámaras IP Ultra HD AXSS POINT. URL: https://youtu.be/eJNL5_Obgus?si=ZWbntguARWDLMExy.

O.M Golovin

VIDEO SEQUENCE ENHANCEMENT IN VIDEO ANALYTICS SYSTEMS

Abstract. A video enhancement method based on applying gamma correction is proposed. Its realization implies processing all video frames using a single algorithm. The proposed algorithm, due to the preservation of inter-frame coherence throughout the entire video, significantly reduces the time spent searching for the optimal value of the gamma parameter, which ensures the highest quality of the frame reaching the maximum possible level in the automatic mode in the sense of both visual observation and the determination of key points and the selection of contours of objects in images. The method is characterized by high adaptability to sudden changes in the lighting of the scene, preservation of interframe coherence, and the absence of any side negative artifacts in the enhanced video. A toolkit for automatically determining the optimal value of the gamma parameter for video frames is developed. It significantly increases the efficiency of video analytics systems, image and video segmentation and processing processes due to reducing the negative impact of the scene lighting mode on image quality.

Keywords: gamma-correction, video analytics system, video sequence enhancement, histogram, cumulative histogram, video processing, interframe coherence.

Надійшла до редакції 22.01.2024