

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук,
асистента кафедри комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
ДВОРЖАК Валентини Володимирівни
на дисертаційну роботу **ГНАТЮКА Юрія Анатолійовича**
на тему «Інтелектуальне підвищення роздільної здатності зображень у
телекомунікаційних системах»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»
з галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

З кожним роком зростає значущість та сфера телекомунікаційних систем, які застосовуються для передавання зображень та відеопотоку. Цьому сприяє як доступність апаратно-програмного забезпечення, так й тенденція до автоматизації різноманітних процесів. Засоби дистанційного відеоспостереження та аналізу застосовуються у новітніх системах технічного та екологічного моніторингу. Для ряду таких систем, наприклад, для систем моніторингу стану сільськогосподарських культур, важливими вимогами є мобільність і низьке енергоспоживання. Наслідком таких вимог є відносно низька швидкість передавання для каналів зв'язку, що значно сповільнює передавання зображень. Це особливо важливо при використанні сучасних відеокамер, які характеризуються високою роздільною здатністю зображень. У багатьох випадках завдання технічного та екологічного моніторингу передбачають мобільну підсистему передавання зображень з використанням радіоканалів.

На даний час практично застосовуються телекомунікаційні системи, в яких для зменшення затримок в каналах зв'язку застосовується передавання зображень у зменшеному масштабі. Такий підхід передбачає зменшення масштабу початкового зображення в підсистемі передачі та відновлення масштабу зображення до початкового у підсистемі прийому.

Масштабування зображень часто виконується методами інтерполяції та засобами штучних нейронних мереж (ШНМ). Перевагою методів інтерполяції, наприклад, білінійної та бікубічної, є простота їх апаратно-програмної реалізації та висока швидкодія, проте на зображення-результатах інтерполяції виникають спотворення. При цьому можна вибрати алгоритм інтерполяції, який забезпечує найменшу похибку масштабування для певних типів зображень з відповідним їм середнім просторовим періодом розподілу яскравості. Спотворення на масштабованих зображеннях також можливо зменшити за допомогою попередньо навчених згорткових нейронних мереж (ЗНМ). Таким чином, розглянута дисертація присвячена актуальній проблемі – розробці телекомунікаційних систем для передавання зображень в умовах обмеженої пропускної здатності та низького енергоспоживання, що важливо, зокрема, для автономних систем моніторингу та IoT. З цієї причини дисертаційне дослідження Гнатюка Ю.А. є, безумовно, актуальним.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами

Наукові дослідження дисертаційної роботи Гнатюка Ю.А. проводилися згідно з науковим напрямом кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Результати досліджень пов'язані з науковою проблемою, що вирішується кафедрою радіотехніки та інформаційної безпеки «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (Держ. реєстр. №0121U112870, 2021-2025 рр.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Гнатюка Ю.А. характеризуються значним ступенем обґрунтованості. Це досягається за рахунок коректної постановки мети та завдань дослідження, аргументованого вибору методів та засобів розробки, застосування сучасних методів досліджень, узгодженістю теоретичних розрахунків із результатами

модельовання та експериментальними даними, публікаціями основних результатів роботи у фахових виданнях та їх успішною апробацією на науково-практичних конференціях.

Наукова новизна дисертації

Основними науковими результатами, одержаними у дисертаційній роботі Гнатюка Ю.А., є такі:

1. Уперше розроблено метод передавання зображень у зменшеному масштабі засобами телекомунікаційної системи за допомогою радіомодулів із несучою частотою 2.4 ГГц, який відрізняється від існуючих масштабуванням зображень із адаптивним і комбінованим вибором алгоритмів інтерполяції та корекцією масштабованих зображень за допомогою згорткової нейронної мережі, що забезпечує зменшення часу передавання зображень при допустимих значеннях для їх спотворень.

2. Подальшого розвитку отримала методика для аналізу точності та швидкодії масштабування зображень за допомогою алгоритмів інтерполяції, особливістю якої є підтвердження гіпотези про нормальний розподіл значень похибки масштабування RMSE для досліджуваних алгоритмів інтерполяції зображень та обчислення меж довірчого інтервалу для значень RMSE, що дозволило впорядкувати алгоритми інтерполяції у порядку збільшення їх похибки масштабування.

3. Вперше розроблено методику для масштабування зображень, особливістю якої є адаптивний вибір алгоритмів інтерполяції на основі середнього просторового періоду зображень, що дає змогу зменшити спотворення зображень після зменшення та збільшення їх масштабу у телекомунікаційній системі.

4. Подальшого розвитку отримала методика корекції спотворень на зображеннях за допомогою згорткової нейронної мережі з архітектурою надроздільної здатності, яка відрізняється від існуючих комбінованим застосуванням алгоритмів інтерполяції при масштабуванні вхідних зображень,

що забезпечує високе значення пікового відношення сигнал/шум для зображень на виході телекомунікаційної системи.

Вважаю, що наукові результати, отримані Гнатюком Ю.А. під час виконання дисертації, є суттєвими і корисними для впровадження в телекомунікаційні системи з інтелектуальним масштабуванням зображень.

Практичне значення результатів дисертації

Отримані у дисертаційному дослідженні Гнатюка Ю.А. методики та апаратно-програмні засоби можуть практично застосовуватися в телекомунікаційних системах з низьким енергоспоживанням, призначених для передавання зображень для завдань дистанційного моніторингу. Результати дисертаційної роботи на практиці реалізовано, зокрема, у системах відеоспостереження ІТ-компанії ТОВ «Юкон-Софтваре», а також впроваджено в освітній процес на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Результати впровадження підтверджуються відповідними актами.

Аналіз структури дисертації

За структурою дисертаційне дослідження Гнатюка Ю.А. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить анотацію, перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та вісім додатків. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки, з яких 138 сторінок основного тексту.

У *вступі* дисертант обґрунтовує її актуальність, формулює об'єкт та предмет дослідження, мету та завдання, описує використані методи дослідження, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, їх наукову новизну, наводить відомості про апробацію роботи.

Перший розділ орієнтований на огляд та аналіз сучасного стану розвитку телекомунікаційних систем, які застосовуються для передавання зображень і відеопотоку. З цією метою проаналізовано ряд сучасних телекомунікаційних систем-аналогів, сферою застосування яких дистанційний моніторинг. Розглянуто ряд технологій та протоколів, які застосовуються для

безпроводної передачі даних. Наприклад, розглянуто протокол Enhanced ShockBurst, який застосовується для передавання даних через радіомодулі NRF24L01. Обґрунтовано доцільність передавання зображень у зменшеному масштабі при використанні радіоканалів з обмеженою пропускнуою здатністю. Описано методи інтерполяції зображень та архітектури згорткових нейронних мереж, які застосовуються для масштабування зображень, наприклад, архітектуру SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network).

Другий розділ присвячений опису розробленої телекомунікаційної системи для передавання зображень у зменшеному масштабі за допомогою радіомодулів. Розглянуто структуру системи, яка містить підсистеми передачі та прийому, описано призначення та взаємозв'язки її основних блоків. Розроблено електричні схеми підсистеми передачі та прийому, описано їх основні сигнали та принципи роботи. Підсистему передачі побудовано на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi, керування яким виконується розробленою програмою на мові Python. Призначенням підсистеми передавання є зчитування зображень з відеокамер через USB порт, зменшення їх масштабу алгоритмами інтерполяції та передавання зображень у вигляді пакетів через радіомодулі nRF24L01. За рахунок передавання зображень у зменшеному масштабі зменшується завантаженість каналів зв'язку. Призначенням підсистеми прийому є зчитування пакетів зображень з радіомодуля nRF24L01 за допомогою мікроконтролера Funduino Uno, перетворення їх у формат зображень і надсилання в комп'ютер. У комп'ютері виконується інтелектуальне підвищення роздільної здатності зображень засобами згорткових нейронних мереж, чим забезпечується висока візуальна якість отриманих зображень.

У *третьому розділі* викладено розроблену методику для оцінки точності та швидкодії алгоритмів інтерполяції (найближчого сусіда, Ланцоша, білінійної та бікубічної інтерполяції). Розроблена методика дозволяє вибирати алгоритм інтерполяції зображень на основі його точності та швидкодії. Розроблено також методику для регресійного аналізу похибок масштабування

зображень, отриманих методами білінійної або бікубічної інтерполяції. У результаті регресійного аналізу встановлено залежність похибки масштабування від середнього просторового періоду зображень, що дає змогу адаптивно вибирати алгоритм інтерполяції зображення залежно від його просторового періоду. Показано, що похибки масштабування зображень можна зменшити за рахунок застосування різних алгоритмів інтерполяції при зменшенні та збільшенні масштабу зображень.

У *четвертому розділі* викладено розроблену методику для корекції масштабованих зображень, яка базується на використанні згорткових нейронних мереж з архітектурою надроздільної здатності SRCNN. Згідно із запропонованою методикою збільшення масштабу зображень у підсистемі прийому виконується спочатку алгоритмами інтерполяції (білінійної та бікубічної), після чого дефекти масштабування зменшуються засобами нейромережі SRCNN. Проведено тестування розробленої телекомунікаційної системи на прикладах передавання зображень.

У *висновках* дисертаційної роботи узагальнено та підсумовано результати дисертаційного дослідження.

Список використаних джерел є відповідним до тематики дисертації, містить достатню кількість нових літературних джерел.

Додатки містять список публікацій аспіранта за темою дисертації, відомості про апробацію результатів дисертації та фрагменти програмного коду для розробленого програмного забезпечення.

Оформлення результатів, дотримання вимог академічної доброчесності, повнота викладу наукових результатів у публікаціях

Розглянута дисертація Гнатюка Ю.А. є завершеним науковим дослідженням, структура якої є чіткою та логічною. Результати перевірки дисертації на академічний плагіат показали, що робота характеризується високою самостійністю та індивідуальністю. У дисертації відсутні запозичення та використання результатів інших авторів без посилання на їхні

джерела. Проведений аналіз підтверджує відповідність дисертаційного дослідження Гнатюка Ю.А. до норм академічної доброчесності.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження Гнатюка Ю.А. опубліковано у 9 наукових працях, до яких належать 3 статті у фахових виданнях України та 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. У всіх спільних роботах чітко простежується особистий внесок автора.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. У роботі використовується архітектура SRCNN (Super-Resolution CNN), яка потребує попереднього збільшення масштабу зображення методами інтерполяції і характеризується відносно низькою швидкістю. Доцільно було б використано для масштабування зображень більш сучасні архітектури нейронних мереж (наприклад, FSRCNN або ESPCN), які забезпечують високу швидкість обробки зображень.

2. Автор дисертації виконує оцінку якості масштабованих зображень переважно за метриками кореня середньої квадратичної похибки RMSE та пікового відношення сигнал/шум PSNR, проте, не використовує сучасні метрики для оцінки візуальної якості зображень. Такі метрики, зокрема, метрика SSIM (Structural Similarity Index) або перцептивна метрика LPIPS, дозволили б більш повно оцінити візуальну якість зображень.

3. У роботі показано, що зменшене зображення передається швидше і тому витрачається менше енергії радіомодуля. Проте, на приймаючій стороні функціонує згорткова нейромережа, яка є дуже ресурсоємною. Тому потрібно чітко вказати, для якої частини телекомунікаційної системи є критичним низьке енергоспоживання.

Вважаю, що вищенаведені зауваження не є принциповими, а тому не применшують загальну новизну роботи, не впливають на її позитивну оцінку.

Загальні висновки

Подана до захисту дисертаційна робота Гнатюка Ю.А. призначена для вирішення важливого завдання побудови телекомунікаційних систем, в яких

виконується передавання зображень з інтелектуальним підвищенням їх роздільної здатності засобами штучних нейромереж. За актуальністю теми, науковим рівнем, обсягом виконаних досліджень, науковою новизною та практичною цінністю одержаних результатів дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Враховуючи актуальність, високий науковий рівень та результати дослідження вважаю, що дисертаційна робота Гнатюка Ю.А на тему «Інтелектуальне підвищення роздільної здатності зображень у телекомунікаційних системах» цілком відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а автор дисертації Гнатюк Юрій Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка» у галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації».

Рецензент:

кандидат технічних наук,
асистент кафедри комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича



Валентина ДВОРЖАК

Підпис *Дворжак В.*
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Дворжак В.
20 травня 2024

