

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора,

професора кафедри комп'ютерної інженерії

Західноукраїнського національного університету

БЕРЕЗЬКОГО Олега Миколайовича

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»

галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність дисертаційного дослідження

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних систем, призначених для передавання цифрових зображень, характеризується їх широким застосуванням у системах технічного та екологічного моніторингу, зокрема, у системах моніторингу стану сільськогосподарських культур. Зчитування зображень у таких системах виконується з відеокамер у підсистемі передачі, після чого зображення передаються через провідні або безпроводні канали зв'язку у підсистему прийому. Застосування безпроводних каналів на основі радіомодулів є особливо ефективним у випадку мобільних підсистем передачі.

Для багатьох телекомунікаційних систем, наприклад систем екологічного моніторингу, важливим є низьке енергоспоживання підсистеми передачі, що може призводити до низької пропускну здатності каналів зв'язку. Одним із способів зменшення завантаженості каналів зв'язку є передавання зображень у зменшеному масштабі з наступним збільшенням масштабу у системі прийому. При цьому зміна масштабу виконується, наприклад, методами інтерполяції та засобами штучних нейронних мереж (ШНМ), а саме згорткових нейронних мереж (ЗНМ).

Проблема, яка виникає під час передавання масштабованих зображень, полягає у виникненні дефектів на масштабованих зображеннях, наприклад, у надмірному згладжуванні зображень. Застосування алгоритмів білатеральної та бікубічної інтерполяції призводить до різних спотворень зображень, тому для певного типу зображень можливо вибирати конкретний алгоритм інтерполяції. Спотворення на зображеннях, масштабованих ЗНМ, можливо зменшити шляхом вибору структури нейромережі та параметрів її навчання.

У дисертації Гнатюка Юрія Анатолійовича вирішено ряд завдань, які виникають при передаванні зображень у телекомунікаційних системах шляхом їх інтелектуального масштабування із використанням ЗНМ, тому робота є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертаційна робота Гнатюка Ю. виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Вибрана тематика дисертаційного дослідження пов'язана з науковою темою, 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.).

Аналіз структури дисертації

Дисертаційна робота є завершеною науково-дослідною роботою яка складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та восьми додатків. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки, з них 138 сторінок основного тексту.

У *вступі* дисертації описано тематику роботи та обґрунтовано її актуальність, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету

та завдання, описано методи дослідження, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію роботи.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану розвитку телекомунікаційних систем, призначених для передавання зображень. Розглянуто ряд телекомунікаційних систем, які застосовуються для діагностики віддалених об'єктів. Описано технології та протоколи безпроводної передачі даних, зокрема протоколи ZigBee та Enhanced ShockBurst. Виконано опис методів та засобів масштабування зображень. Розглянуто основні архітектури штучних нейронних мереж, які застосовуються для масштабування зображень, зокрема архітектуру надроздільної здатності SRCNN. Обґрунтовано доцільність передавання зображень через канали телекомунікаційної системи у зменшеному масштабі у випадку застосування радіомодулів з низьким енергоспоживанням. Показано, що застосування штучних нейронних мереж є перспективним способом зменшення спотворень на зображеннях-результатах.

У другому розділі дисертант розробив структуру телекомунікаційної системи, призначеної для передавання зображень у зменшеному масштабі, виконав її апаратно-програмну реалізацію. У підсистемі передачі розробленої системи виконується зчитування зображень з USB відеокамер та їх передавання через безпроводну лінію зв'язку за допомогою радіомодулів nRF24L01. Керування підсистемою передачі виконується мікрокомп'ютером Raspberry Pi за допомогою розробленої програми на мові Python. З метою зменшення завантаженості каналів зв'язку зображення в підсистемі передачі зменшуються у масштабі, а в системі прийому їх масштаб відновлюється. На приймаючій стороні зображення зчитуються з радіомодуля за допомогою мікроконтролера Funduino Uno та керуючої програми, після чого надсилаються в комп'ютер. Зменшення масштабу зображень реалізовано швидкодіючими алгоритмами білінійної та бікубічної інтерполяції. Збільшення масштабу зображень виконується методами інтерполяції та нейромережними методами. Особливістю розробленої є інтелектуальне

підвищення роздільної здатності зображень засобами штучних нейронних мереж. У середовищі автоматизованого проектування «EasyEDA Pro» розроблено електричні принципові схеми, описано принципи їх функціонування.

Третій розділ присвячено розробці методики, яка дозволяє оцінювати точність та швидкодію поширених алгоритмів інтерполяції, а саме найближчого сусіда, білінійної та бікубічної інтерполяції, Ланцоша. Завдяки такій методиці можна цілеспрямовано вибирати алгоритм інтерполяції зображень залежно від його точності та швидкодії. Також дисертант розробив методику регресійного аналізу даних для обробки результатів масштабування зображень алгоритмами інтерполяції. Проведено аналіз спотворень на зображеннях, для яких зменшення та збільшення масштабу виконувалося білінійною або бікубічною інтерполяцією. На основі регресійного аналізу встановлено залежність похибки інтерполяції від середнього просторового періоду зображень. Завдяки цьому реалізовано адаптивний вибір алгоритму інтерполяції зображення залежно від його просторового періоду. Показано, що зменшення та збільшення масштабу зображень різними алгоритмами інтерполяції у більшості випадків призводить до меншої похибки, ніж масштабування тільки алгоритмом білінійної або бікубічної інтерполяції.

У четвертому розділі дисертант розробив математичну модель та методику для корекції масштабованих зображень з використанням штучних нейронних мереж. Згідно з розробленою методикою збільшення масштабу зображень у підсистемі прийому виконано спочатку алгоритмами білінійної та бікубічної інтерполяції, а після цього дефекти на зображеннях коректувалося за допомогою згорткової нейронної мережі з архітектурою надроздільної здатності SRCNN. Розглянуто приклади передавання зображень в телекомунікаційній системі при зміні їх масштабу в 2 рази.

Висновки дисертаційної роботи повністю охоплюють отримані результати, підтверджують їх наукову новизну та практичну цінність.

Список використаних джерел повністю охоплює предметну галузь, містить значну кількість новітніх літературних джерел українських та закордонних авторів.

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

Наукова новизна одержаних результатів

До основних **наукових результатів**, одержаних Гнатюком Ю.А., належать 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 отримані дисертантом наукові результати є новими і є внеском у розвиток телекомунікаційних систем, призначених для передавання зображень.

Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність результатів дисертації Гнатюка Ю. забезпечується коректною постановкою задачі, мети та завдань досліджень, аргументованим вибором методів та засобів розробки. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується застосуванням сучасних методів досліджень, узгодженістю теоретичних розрахунків із результатами моделювання та експериментально отриманими даними, а також підтверджується публікаціями основних результатів роботи та їх успішною апробацією на науково-практичних конференціях.

Практична цінність одержаних результатів

Розроблені у дисертаційній роботі Гнатюка Ю. засоби можуть використовуватися для побудови телекомунікаційних систем з низьким енергоспоживанням, що важливо для сучасних систем технічного та екологічного моніторингу.

Зокрема, результати дисертації практично використано у системах відеоспостереження ІТ-компанії ТОВ «Юкон-Софтваре», а також впроваджені в освітній процес на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, що підтверджується актами впровадження.

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

Дисертація є завершеним науковим дослідженням, має логічну структуру, висновки коректно відображають отримані результати. Результати перевірки дисертаційної роботи на академічний плагіат свідчать про самостійність та індивідуальність роботи. Відсутні запозичення та використання результатів інших авторів без посилання на їхня джерела. Це підтверджує відповідність дисертації Гнатюка Ю.А. нормам академічної доброчесності.

Основні положення та результати дисертації опубліковано у 9 наукових працях, серед яких 3 статті у фахових виданнях України та 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. Отже, вимоги до кількості та якості публікацій дисертантом витримано.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

Недоліки дисертаційної роботи такі:

1. У розділі 3 при встановленні регресійних залежностей між похибкою масштабування та середнім просторовим періодом зображень використано тільки окремі типи зображень, проте не проведено аналіз для інших типів зображень.
2. У дисертації розглянуто приклади передавання зображень при зменшенні та збільшенні їх масштабу з масштабним коефіцієнтом 2, проте не розглянуто приклади обробки зображень з іншими масштабними коефіцієнтами.
3. У розділі 4 описано масштабування зображень з використанням нейронних мереж з архітектурою SRCNN, проте для масштабування зображень не застосовано інші більш сучасні архітектури нейронних мереж.

4. У розділі 1 дисертанту доцільно було б привести детальну архітектуру SRCNN, яка використовується для масштабування зображень.
5. У дисертації не проведено аналізу та обґрунтування метрик, які використовуються для кількісної оцінки масштабування зображень.
6. У другому розділі текст перенасичений принциповими схемами підсистем телекомунікаційної системи. Тому, доцільно було б частину принципів схем перенести у додатки.
7. У тексті дисертації зустрічаються термінологічні неточності, граматичні та синтаксичні помилки.

Вважаю, що наведені зауваження не є визначальними і не применшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальні висновки

Подана до захисту дисертаційна робота Гнатюка Ю.А. є завершеною науковою працею, яка вирішує ряд завдань побудови телекомунікаційних систем для передавання зображень у зменшеному масштабі. За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, науковою повнотою та цінністю одержаних результатів дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Враховуючи актуальність та науковий рівень роботи 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».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
Західноукраїнського
національного університету



Олег БЕРЕЗЬКИЙ