

АНОТАЦІЯ

Гнатюк Ю.А. Інтелектуальне підвищення роздільної здатності зображень у телекомунікаційних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробленню телекомунікаційних систем для передавання зображень у зменшеному розмірі з метою зниження навантаження на канали зв'язку, що особливо важливо у випадку застосування автономних систем із низьким енергоспоживанням. У таких системах на передавальній стороні початкові зображення зчитуються з відеокамер і масштабуються до зображень меншого розміру, які передаються через телекомунікаційні канали. На приймаючій стороні телекомунікаційної системи зображення зменшеного розміру зчитуються і масштабуються до зображень, розмір яких рівний або більший розміру початкових.

Проте, в процесі зменшення та збільшення масштабу на зображеннях виникають характерні спотворення. Тому розробка телекомунікаційної системи з інтелектуальним підвищенням роздільної здатності є **актуальним завданням** з наукової та практичної точок зору. Спотворення масштабованих зображень запропоновано зменшувати за рахунок адаптивного та комбінованого вибору алгоритмів інтерполяції, а також наступної корекції зображень засобами згорткових нейронних мереж (ЗНМ).

Метою дисертаційної роботи є розробка апаратно-програмних засобів інтелектуальної телекомунікаційної системи, яка забезпечує передавання зображень у зменшеному масштабі, відновлення масштабу переданих зображень методами інтерполяції та засобами згорткових нейронних мереж із заданими обмеженнями на величину спотворень зображень, пропускну здатність каналів системи та її енергоспоживання.

Досягнення мети передбачало виконання таких **завдань**:

1. Провести аналіз сучасних телекомунікаційних систем, які призначені для передавання зображень, та методів масштабування зображень, зокрема, алгоритмами інтерполяції та з використанням штучних нейронних мереж.
2. Розробити структуру телекомунікаційної системи, яка призначена для передавання зображень у зменшеному масштабі та інтелектуального підвищення роздільної здатності зображень алгоритмами інтерполяції та засобами згорткових нейронних мереж.
3. Розробити методику для аналізу точності та швидкодії алгоритмів інтерполяції зображень, які застосовуються при зменшенні та збільшенні масштабу зображень у телекомунікаційній системі.
4. Розробити математичну модель, методику та комп'ютерну програму для зменшення та збільшення масштабу зображень методами інтерполяції з урахуванням середнього просторового періоду зображень, дослідити можливості методики при масштабуванні тестових зображень.
5. Розробити методику та програмні засоби для зменшення спотворень на зображеннях, які масштабовані алгоритмами інтерполяції, засобами згорткової нейронної мережі.
6. Розробити структурну та електричну принципову схему телекомунікаційної системи для передавання зображень у зменшеному масштабі з використанням радіомодулів та інтелектуального підвищення роздільної здатності зображень.
7. Виконати апаратно-програмну реалізацію та дослідження інтелектуальної телекомунікаційної системи для передавання зображень.

Для досягнення мети застосовувалися такі методи дослідження: теорія чисельних методів, теорія алгоритмів, методи інтерполяції зображень, регресійний аналіз, лінійна регресія, методи штучного інтелекту та машинного навчання, згорткові нейронні мережі. Для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень проведено комп'ютерне моделювання, експериментальну перевірку функціонування розробленої системи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання проведених досліджень, описано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлено методи, об'єкт і предмет досліджень, вказано особистий внесок здобувача, а також наведено дані щодо публікацій за темою дисертації.

У першому розділі здійснено проведено аналіз сучасних телекомунікаційних систем для передавання зображень та методів масштабування зображень, розглянуто можливості масштабування зображень методами інтерполяції та з використанням штучних нейронних мереж. Обґрунтовано доцільність передавання зображень через канали телекомунікаційної системи у зменшеному масштабі з метою зменшення завантаженості таких каналів зв'язку. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих алгоритмів підвищення масштабу зображень. Зроблено висновок про доцільність масштабування зображень з використання штучних нейронних мереж, а саме згорткових нейронних мереж.

Другий розділ присвячений опису розробленої структури телекомунікаційної системи з інтелектуальним підвищенням роздільної здатності зображень та її апаратно-програмної реалізації. За будовою телекомунікаційна система складається з підсистем передачі та прийому. У підсистемі передачі початкові зображення об'єктів зчитуються за допомогою USB-відеокамери, приєднаної до мікрокомп'ютера Raspberry Pi. Зчитування кольорових зображень з відеокамери виконується програмою на мові Python, яка також виконує зменшення масштабу зображень. Масштабовані зображення передаються через телекомунікаційні канали з використанням радіомодулів nRF24L01 №1 та №2 на передаючій та приймаючій стороні відповідно. На приймаючій стороні зображення зчитуються з радіомодуля №2 за допомогою мікроконтролера Funduino Uno, після чого передаються в комп'ютер через USB порт. Розроблено електричну принципову схему телекомунікаційної системи засобами середовища автоматизованого проектування «EasyEDA Pro», виконано її апаратно-програмну реалізацію. У підсистемі передачі початкове

зображення перетворюється з кольорової моделі RGB у модель YCrCb, після чого масштаб зображення зменшується алгоритмом білінійної або бікубічної інтерполяції. У підсистемі прийому масштаб зчитаного зображення у моделі YCrCb збільшується алгоритмом інтерполяції, а на зображенні каналу яскравості дефекти масштабування коректуються засобами ЗНМ. Отримане зображення зі збільшеним масштабом перетворюється в модель RGB.

У третьому розділі розроблено методику для аналізу точності та швидкодії алгоритмів інтерполяції: найближчого сусіда, білінійної та бікубічної інтерполяції, Ланцоша. Точність масштабування оцінено через корінь середньої квадратичної помилки (Root Mean Square Error – RMSE) між значеннями пікселів початкового та масштабованого зображення. Результати досліджень показали, що в більшості випадків найменшу помилку масштабування забезпечує алгоритм бікубічної інтерполяції, який незначно поступається за швидкістю алгоритмам найближчого сусіда та білінійної інтерполяції.

Розроблено математичну модель методики регресійного аналізу даних для результатів масштабування зображень алгоритмами інтерполяції. Виконано масштабування множини зображень різних типів, зокрема, зображень смуг Кікучі та X-променевих біомедичних зображень. Обробка зображень полягала в зменшенні та збільшенні масштабу зображень алгоритмами білінійної або бікубічної інтерполяції. Проаналізовано вплив середнього просторового періоду T_{CR} зображення на помилку масштабування. Встановлено, що залежність помилки масштабування від значень просторового періоду T_{CR} зображень описуються рівнянням регресії у вигляді поліному. Адаптивність масштабування реалізовано шляхом класифікації зображень та вибору алгоритму інтерполяції зображення залежно від його періоду T_{CR} . Встановлено, що для значень $T_{CR} < 4.45$ пікселі меншу похибку забезпечує білінійна інтерполяція, а в іншому випадку – бікубічна. Також встановлено, що комбіноване зменшення масштабу білінійною інтерполяцією та збільшення масштабу бікубічною у більшості випадків забезпечує меншу помилку, ніж окреме застосування алгоритмів бікубічної та білінійної інтерполяції.

Четвертий розділ присвячено розробленню математичної моделі та методики корекції масштабованих зображень засобами згорткових нейронних мереж. Збільшення масштабу зображення виконано методами білінійної та бікубічної інтерполяції, після чого отримане зображення коректувалося засобами нейронної мережі SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network). Під час глибокого навчання на входи нейронної мережі подавалися фрагменти зображень після інтерполяції, а на виходи подалися відповідні фрагменти початкових зображень. При зменшенні масштабу початкового зображення у 2 рази на приймаючій стороні отримується зображення без значних спотворень, а час передачі при цьому зменшується приблизно в 4 рази.

У процесі виконання роботи отримано такі **наукові результати**:

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.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблені апаратно-програмні засоби телекомунікаційної системи можуть бути використані для інтелектуального масштабування зображень в системах відеоспостереження з низьким енергоспоживанням, наприклад, в системах технічного та екологічного моніторингу, дистанційного зондування та моніторингу стану сільськогосподарських культур, які не потребують високої швидкості передачі даних.
2. Розроблені засоби телекомунікаційної системи можуть застосовуватися в геоінформаційних системах (ГІС) для дистанційного моніторингу навколишнього середовища, аналізу даних про стан рослинності, ґрунтів та інших об'єктів, у системах комп'ютерного діагностування, а також для передачі зображень між пристроями Інтернету речей. Початкові зображення можуть зчитуватися з USB-відеокамер або з відеокамер смартфонів.
3. Розроблені програмні засоби можуть використовуватися для цифрової обробки спеціальних типів зображень, зокрема, зображень текстових документів, електронно-дифракційних та X-променевих зображень, для яких важливими є мінімальні спотворення у процесі масштабування.

Ключові слова: аналіз даних, геоінформаційні системи (ГІС), глибоке навчання, дистанційне зондування, згорткові нейронні мережі (ЗНМ), інтернет речей (IoT), класифікація (класифікація зображень), машинне навчання, регресійний аналіз, лінійна регресія, системи комп'ютерного діагностування (CAD), смартфон, штучний інтелект, штучні нейронні мережі (ШНМ), інтелектуальна система.

ABSTRACT

Yurii Hnatiuk. Intellectual increase of image resolution in telecommunication systems. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2026.

The dissertation work is intended for the development of telecommunication systems for transmitting images in a reduced size in order to reduce the load on communication channels, which is especially important in the case of autonomous systems with low power consumption. In such systems, on the transmitting side, the original images are read from video cameras and scaled to smaller images that are transmitted via telecommunication channels. On the receiving side of the telecommunication system, the reduced images are read and scaled to images whose size is equal to or larger than the original ones.

However, in the process of reducing and increasing the scale of the images, characteristic distortions appear. Therefore, the development of a telecommunication system with intelligent resolution enhancement is a **relevant task** from a scientific and practical point of view. It is proposed to reduce the distortion of scaled images by adaptive and combined selection of interpolation algorithms, as well as subsequent image correction using convolutional neural networks (CNN).

The purpose of the dissertation is to develop hardware and software tools for an intelligent telecommunications system that provides image transmission on a reduced scale, restoration of the scale of transmitted images using interpolation methods and convolutional neural networks with specified restrictions on the amount of image distortion, the bandwidth of the system channels, and its energy consumption.

Achieving the goal involved the **following tasks**:

1. To analyze modern telecommunication systems designed for image transmission and image scaling methods, in particular, by interpolation algorithms and using artificial neural networks.

2. To develop a telecommunications system structure designed for transmitting images on a reduced scale and intelligently increasing image resolution using interpolation algorithms and convolutional neural networks.

3. Develop a method for analyzing the accuracy and speed of image interpolation algorithms used when reducing and increasing the scale of images in a telecommunications system.

4. To develop a mathematical model, method and software tools for reducing and increasing the scale of images using interpolation methods taking into account the average spatial period of images, to investigate the capabilities of the proposed image scaling method.

5. To develop a method and software tools to reduce distortions in images scaled by interpolation algorithms using convolutional neural networks.

6. Develop a structural and electrical schematic diagram of a telecommunications system for transmitting images on a reduced scale using radio modules and intelligent image resolution enhancement.

7. Perform hardware and software implementation and research of an intelligent telecommunications system for image transmission.

To achieve the goal, the following research methods were used: theory of numerical methods, theory of algorithms, methods of image interpolation, regression analysis, linear regression, artificial intelligence and machine learning methods, convolutional neural networks. To analyze and verify the reliability of the obtained theoretical provisions, computer modeling and experimental verification of the functioning of the developed system were carried out.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the goal and objectives of the research, describes the scientific novelty and practical significance of the results obtained, presents the methods, object and subject

of the research, indicates the personal contribution of the applicant, and also provides data on publications on the topic of the dissertation.

The first section analyzes modern telecommunication systems for image transmission and image scaling methods, considers the possibilities of image scaling using interpolation methods and using artificial neural networks. The feasibility of transmitting images through telecommunication system channels on a reduced scale in order to reduce the load on such communication channels is substantiated. The advantages and disadvantages of existing image scaling algorithms are analyzed. A conclusion is drawn about the feasibility of image scaling using artificial neural networks, namely convolutional neural networks.

The second section is devoted to the description of the developed structure of the telecommunication system with intelligent image resolution enhancement and its hardware and software implementation. The telecommunication system consists of transmission and reception subsystems. In the transmission subsystem, the initial images of objects are read using a USB video camera connected to the Raspberry Pi microcomputer. Reading of color images from the video camera is performed by a program in the Python language, which also performs image scaling. The scaled images are transmitted via telecommunication channels using nRF24L01 radio modules # 1 and # 2 on the transmitting and receiving sides, respectively. On the receiving side, the images are read from radio module #2 using the Funduino Uno microcontroller, after which they are transmitted to the computer via a USB port. An electrical schematic diagram of the telecommunication system has been developed using the EasyEDA Pro computer-aided design environment, and its hardware and software implementation has been performed. In the transmission subsystem, the original image is converted from the RGB color model to the YCrCb model, after which the image scale is reduced by the bilinear or bicubic interpolation algorithm. In the reception subsystem, the scale of the read image in the YCrCb model is increased by the interpolation algorithm, and the scaling defects in the brightness channel image are corrected by means of CNN. The resulting image with an increased scale is converted to the RGB model.

In the third section, a method has been developed for analyzing the accuracy and speed of interpolation algorithms: nearest neighbor, bilinear and bicubic interpolation, and Lanczos. The scaling accuracy is estimated through the Root Mean Square Error (RMSE) between the pixel values of the original and scaled images. The results of the research showed that in most cases the smallest scaling error is provided by the bicubic interpolation algorithm, which is slightly inferior in speed to the nearest neighbor and bilinear interpolation algorithms.

A mathematical model of the regression analysis method for the results of image scaling by interpolation algorithms was developed. A set of images of different types was scaled, in particular, Kikuchi band images and X-ray biomedical images. Image processing consisted of reducing and increasing the scale of images by bilinear or bicubic interpolation algorithms. The influence of the average spatial period T_{CR} of the image on the scaling error was analyzed. It was established that the dependence of the scaling error on the values of the spatial period T_{CR} of the images is described by a regression equation in the form of a polynomial. Scaling adaptability was implemented by classifying images and choosing an image interpolation algorithm depending on its T_{CR} period. It was established that for values $T_{CR} < 4.45$ pixels, a smaller error is provided by bilinear interpolation, and otherwise by bicubic interpolation. It has also been found that combined downscaling by bilinear interpolation and upscaling by bicubic in most cases provides a smaller error than the separate application of bicubic and bilinear interpolation algorithms.

The fourth section is devoted to the development of a mathematical model and a method for correcting scaled images using convolutional neural networks. The image was scaled using bilinear and bicubic interpolation methods, after which the resulting image was corrected using a convolutional neural network with the SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network) architecture. During deep learning, fragments of images after interpolation were fed to the inputs of the neural network, and the corresponding fragments of the original images were fed to the outputs. When the scale of the original image is reduced by 2 times, an image without

significant distortions is obtained on the receiving side, and the transmission time is reduced by approximately 4 times.

In the process of carrying out the work, the following **scientific results** were obtained:

1. For the first time, a method for transmitting images on a reduced scale by means of a telecommunication system using radio modules with a carrier frequency of 2.4 GHz has been developed, which differs from existing ones by scaling images with adaptive and combined selection of interpolation algorithms and correction of scaled images using a convolutional neural network, which ensures a reduction in image transmission time at acceptable values for their distortions.

2. Further development was made for a method for analyzing the accuracy and speed of image scaling using interpolation algorithms, the feature of which is the confirmation of the hypothesis of a normal distribution of RMSE scaling error values for the studied image interpolation algorithms and the calculation of confidence interval limits for RMSE values, which allowed the interpolation algorithms to be arranged in order of increasing scaling error.

3. For the first time, a method for scaling images has been developed, the feature of which is the adaptive selection of interpolation algorithms based on the average spatial period of images, which makes it possible to reduce image distortion after reducing and increasing their scale in the telecommunications system.

4. The method of correcting distortions in images using a convolutional neural network with a super-resolution architecture has been further developed, which differs from existing ones by the combined use of interpolation algorithms when scaling input images, which provides a high peak signal-to-noise ratio for images at the output of the telecommunications system.

The practical significance of the work is as follows:

1. The developed hardware and software of the telecommunication system can be used for intelligent image scaling in video surveillance systems with low power consumption, for example, in systems of technical and environmental monitoring,

remote sensing and monitoring of the condition of agricultural crops, which do not require high data transfer rates.

2. The developed telecommunication system tools can be used in geographic information systems (GIS) for remote monitoring of the environment, data analysis on the state of vegetation, soils and other objects, in computer-aided diagnosis systems, as well as for image transmission between Internet of Things devices. The initial images can be read from USB video cameras or from smartphone video cameras.

3. The developed software can be used for digital processing of special types of images, in particular, images of text documents, electron diffraction and X-ray images, for which minimal distortions during the scaling process are important.

Key words: data analysis, geographic information systems (GIS), deep learning, remote sensing, convolutional neural networks (CNN), internet of things (IoT), classification (image classification), machine learning, regression analysis, linear regression, computer-aided diagnosis (CAD) system, smartphone, artificial intelligence, artificial neural networks (ANN), intelligent system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

публікації у фахових виданнях України:

1. Balovsyak S., **Нnatiuk Y.** Analysis of Results of Scaling Digital Images by Interpolation Algorithms. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2024. Vol. 2, No. 1, Paper. 01007. P. 1-6. <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01007>. (Balovsyak S. – наукове керівництво і редагування; **Нnatiuk Y.** – розробка програмного забезпечення, дослідження точності та швидкодії масштабування цифрових зображень за різними алгоритми інтерполяції).

2. **Hnatiuk Y.** Telecommunication System for Transmission of Adaptively Scaled Digital Images. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2025. Vol. 3, No. 1, Paper. 01012. P. 1-6. <https://doi.org/10.31861/sisiot2025.1.01012>.
3. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.** Масштабування цифрових зображень у телекомунікаційній системі методами інтерполяції та за допомогою згорткових нейронних мереж. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Vol. 357, No. 5.1. P. 31-38. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-3>. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво і редагування; **Гнатюк Ю.А.** – розробка методики та програмного забезпечення для масштабування цифрових зображень з використанням методів інтерполяції та згорткових нейронних мереж)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.**, Одайська Х.С. Аналіз апаратно-програмних засобів для підвищення роздільної здатності зображень. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: праці XI Міжнародної науково-практичної конференції (ПШКТ – 2022)*, м. Чернівці, 10–13 листопада 2022 р. Чернівці: Черн. нац. ун-т, 2022. С. 41-43. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво; **Гнатюк Ю.А.** – аналіз апаратно-програмних засобів для масштабування зображень; Одайська Х.С. – редагування)
5. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.** Сучасні апаратно-програмні засоби для підвищення роздільної здатності зображень. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали міжнародної наукової інтернет-конференції*, 8-9 червня 2023 р. Вип. 78. Тернопіль, 2023. С. 28-29. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво і редагування; **Гнатюк Ю.А.** – аналіз апаратно-програмних засобів для масштабування зображень)
6. **Гнатюк Ю.А.** Аналіз засобів підвищення роздільної здатності зображень за допомогою штучних нейронних мереж. *Проблеми інформатики та комп'ютерної*

техніки: праці XII Міжнародної науково-практичної конференції (ПШКТ – 2023), м. Чернівці, 10-12 листопада 2023 р. Чернівці: Черн. нац. ун-т, 2023. С. 75-77.

7. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.** Масштабування зображень засобами згорткових нейронних мереж із архітектурою суперроздільної здатності. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення*: матеріали міжнародної наукової інтернет-конференції, 12-13 червня 2024 р. Вип. 89. Тернопіль, 2024. С. 19-21. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво і редагування; **Гнатюк Ю.А.** – програмна реалізація масштабування зображень за допомогою згорткових нейронних мереж).
8. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.** Телекомунікаційна система для передавання адаптивно масштабованих цифрових зображень. *Фізико-технологічні проблеми передачі, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах*: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції (ПРЕДТ-2025). 15-17 травня 2025 р. Чернівці: Черн. нац. ун-т, 2025. С. 47-48. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво і редагування; **Гнатюк Ю.А.** – розробка апаратно-програмних засобів телекомунікаційної системи для передавання масштабованих цифрових зображень)
9. Баловсяк С.В., **Гнатюк Ю.А.** Телекомунікаційна система для передавання та масштабування цифрових зображень. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки*: праці XIV Міжнародної науково-практичної конференції (ПШКТ – 2025), м. Чернівці, 13-15 листопада 2025 р. Чернівці: Черн. нац. ун-т, 2025. С. 193-194. (Баловсяк С.В. – наукове керівництво і редагування; **Гнатюк Ю.А.** – розробка апаратно-програмних засобів телекомунікаційної системи для масштабування та передавання зображень).