

АНОТАЦІЯ

Берчанов А. А. Метод кодування інфрачервоних зображень з використанням моделей штучного інтелекту в інформаційних системах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки (галузь знань 12 Інформаційні технології). Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2026.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна *науково-прикладна задача*, що полягає у зниженні бітрейту інфрачервоного потоку даних для передачі в інформаційних системах з визначеним рівнем термальної цілісності.

Виявлено потребу зниження бітрейту інфрачервоних потоків даних під час їх передачі в інформаційних системах. Масштабування комплексів моніторингу на базі інфрачервоних сенсорів високої роздільної здатності створює надмірне бітове навантаження та, як наслідок, ускладнює своєчасну доставку даних. Це знижує їхню актуальність для систем прийняття рішень.

Проведено дослідження технічних характеристик сучасних інфрачервоних камер та параметрів генерації тепловізійного ІЧ-трафіку. Аналіз показав, що розширений динамічний діапазон та висока інтенсивність потоку даних призводять до суттєвого росту бітрейту. Водночас застосування існуючих універсальних стандартів стиснення з втратами знижує інформативність семантично важливих теплових сигнатур об'єктів інтересу.

Досліджено методи кодування інфрачервоних зображень, а також підходи до семантико-орієнтованої обробки з використанням моделей штучного інтелекту. Обґрунтовано доцільність застосування метричної оцінки інформативності сегментів у поєднанні з інтелектуальним виявленням об'єктів інтересу.

Сформульовано мету дисертаційного дослідження, яка полягає у розробці методу кодування інфрачервоних зображень (ІЧ-зображень) для зниження бітрейту без втрат термальної цілісності на основі семантико-орієнтовної обробки з використанням моделей штучного інтелекту (ШІ).

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити метод формування двошарової інформативної карти ІЧ-зображень для забезпечення умов щодо зменшення бітрейту з визначеною термальною цілісністю на основі використання моделей ШІ.

2. Створити метод спектрально-групового стиснення сегментів бітових пластів ІЧ-зображень для зменшення бітового об'єму без втрат термальної цілісності

3. Розробити метод семантико-орієнтованого кодування ІЧ-зображень для передачі в інформаційних системах.

4. Створити метод для підвищення термальної цілісності об'єктно-інформативних сегментів ІЧ-зображень без втрат бітрейту в інформаційних системах.

5. Здійснити порівняльну оцінку методів кодування ІЧ-зображень за абляційною методикою.

Об'єктом дослідження є процеси зменшення бітового об'єму ІЧ-кадрів в інформаційно-інтелектуальних системах.

Предметом дослідження є методи кодування інфрачервоних зображень для зменшення бітового навантаження каналів даних у інформаційно-інтелектуальних системах.

Проведено дослідження характеристик ІЧ-потоків, що генеруються сучасними пристроями. Виявлено недоліки при обробці ІЧ-кадрів існуючими

методами кодування. Виявлені обмеження спеціальних ІЧ-кодеків та розповсюджених нейромережових підходів.

Розроблено метод біфуркації бітових пластів кадру із розширеним динамічним діапазоном. Метод дозволяє розділити інформаційну структуру зображення на значущі та фонові складові у рівнях окремих бітових пластів. Такий підхід дозволяє зменшити просторову надлишковість кадру.

Розроблено метод визначення метрики інформативності сегментів. Це дозволяє здійснювати кількісну оцінку інформативності просторових областей на основі їхньої текстурної насиченості.

Розроблено метод формування двопластової інформативної карти інфрачервоного кадру. Метод дозволяє виокремити пріоритетні області обробки у порогово-метричному просторі старшого та молодшого бітових пластів.

Розроблено метод виявлення об'єктно-інформативних сегментів на основі застосування моделей штучного інтелекту. Це дозволяє сегментувати об'єкти інтересу через кон'юнкцію результату нейронної мережі із сформованою картою інформативності. Такий підхід дозволяє обмежити рівень спотворень у пріоритетних областях кадру.

Розроблено метод різницевого кодування для формування мінісегментів зі зменшеним динамічним діапазоном. Це дозволяє трансформувати значення пікселів ІЧ-кадру у локальні температурні відхилення.

Розроблено метод корекції низькочастотних коефіцієнтів на основі високочастотних компонент вейвлет-перетворення. Метод дозволяє звужити динамічний діапазон низькочастотних значень при цьому не вносячи додаткових спотворень.

Розроблено метод адаптивної квантизації на основі рівня інформативності та бітового пласту сегментів. Метод дозволяє

диференційовано розподіляти коефіцієнти квантизації залежно від пріоритетності сегментів. Це рішення дозволяє обмежувати бітрейт ІЧ-поток при встановленому рівні термальності цілісності.

Розроблено метод спектрально-групового кодування сегментів. Метод дозволяє здійснювати структурне кодування спектральних значень за типами частотних груп в умовах квадрореконструкції. Застосування цього підходу зводить обсяг бітового надлишку та зменшує інтенсивність потоку даних.

Проведено абляційний аналіз впливу розроблених методів на кодування ІЧ-кадрів. Відображено, що комплексна інтеграція запропонованих методів кумулятивно знижує бітовий об'єм даних зберігаючи цілісність інформативних областей.

Наукова новизна отриманих результатів досліджень.

1. *Удосконалено* метод побудови двошарової інформативної карти на основі порогових вирішальних правил. Відмінності методу полягають у визначенні адаптивних асоціативних залежностей в порогово-метричному просторі на основі агрегації та нормування інформації високочастотної області перетворення Хаара для сегментованих бітових пластів ІЧ-зображень. Це дозволяє створити умови для збільшення рівня стиснення при встановлених вимогах щодо термальності цілісності ІЧ-зображень.

2. *Отримано подальший розвиток* методу виявлення областей об'єктів інтересу на основі застосування моделі штучного інтелекту. Відмінності методу полягають у виявленні об'єктно-інформативних сегментів за рахунок кон'юнкції результату нейронної мережі із сформованою інформативною картою. Це дозволяє зберегти термальну цілісність об'єктів інтересу за умов обмеженого бітрейту.

3. *Вперше розроблено* метод спектрально-групового стиснення на основі структурних перетворень у хвильовому просторі Хаара. Відмінності методу

полягають у: диференційованому структурному кодуванні хвильового простору сегментів за частотними областями в умовах квадрореконструкції та встановленням нижньої межі високочастотної області. Це дозволяє зменшити бітовий об'єм пластових сегментів ІЧ-зображень без втрат термальної цілісності.

4. *Отримано подальший розвиток* методу кодування ІЧ-зображень на основі семантико-орієнтовної обробки. Відмінності методу полягають у спектрально-груповому кодуванні з врахуванням наявності об'єктно-інформативних сегментів ІЧ-зображень в біфуркаційно-хвильовому просторі Хаара. Це дозволяє знизити бітрейт інфрачервоного потоку даних з визначеним рівнем термальної цілісності в процесі обробки та передачі в інформаційних системах.

5. *Удосконалено* метод відновлення стиснутих ІЧ-зображень на основі використання бігармонічних функцій. Відмінності методу полягають у просторовому прорідженні низькоінформативних областей бітових пластів ІЧ-зображень з їх регенерацією за регулярно-просторовим шаблоном в процесі відновлення з використанням бігармонічних функцій. Це дозволяє підвищити рівень термальної цілісності інформативних сегментів ІЧ-зображень без втрат бітрейту.

Практичне значення отриманих результатів досліджень.

Впровадження розробленого методу кодування ІЧ-зображень у інформаційних системах дозволяє зменшити бітрейт потоку теплових кадрів в межах заданої термальної цілісності, тобто:

– на 8% для кадрів з переважним вмістом низькоінформативних фонових сегментів;

– на 10% для кадрів з переважним вмістом інформативних сегментів, що містять термальні контрасти;

– на 7% для кадрів з переважним вмістом об'єктно-інформативних сегментів, що насичені тепловими сигнатурами об'єктів інтересу.

Для розробленого методу відносно існуючих досягається перевага у застосуванні штучного інтелекту. Це дозволяє підвищити SSIM для об'єктних областей на 93% у порівнянні із існуючими методами. Що задовольняє вимогам по збереженню цілісності теплових полів об'єктів інтересу.

Використання штучного інтелекту у поєднанні із метричним визначенням класу інформативності сегментів дає змогу застосовувати при кодуванні бітових пластів селективні коефіцієнти квантизації. Це дозволяє регулювати PSNR від 24 дБ до 38 дБ, що надає перевагу у коефіцієнті стиснення у 4-10% над існуючими методами.

Бігармонічна реконструкція низькоінформативних областей ПЧ-кадру дозволяє збільшити коефіцієнт стиснення на 6%, при цьому зменшуючи середнє квадратичне відхилення у локальних областях.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, нейронні мережі, інформаційна безпека, модель захищеного обміну даними, семантична сегментація, криптостійкість, виявлення об'єктів, вейвлет-перетворення, обчислювальна складність, кодування зображень, стиснення зображень, комп'ютерний зір, інфрачервоні зображення, цифрова обробка зображень.

ABSTRACT

Berchanov Anatolii. Method of encoding infrared images using artificial intelligence models in information systems – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 Computer Science (field of knowledge 12 Information technologies). V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2026.

In the dissertation, a *scientific and applied problem* is solved related to reducing the bit rate of the infrared data stream for transmission in information systems with a certain level of thermal integrity.

The need to reduce the bit rate of infrared data streams during their transmission in information systems has been identified. Scaling monitoring complexes based on high-resolution infrared sensors creates excessive bit load and, as a result, complicates timely data delivery. This reduces their relevance for decision-making systems.

A study of the technical characteristics of modern infrared cameras and parameters for generating thermal IR traffic has been conducted. The analysis has shown that the extended dynamic range and high intensity of the data stream lead to a significant increase in the bit rate. At the same time, the use of existing universal lossy compression standards reduces the informativeness of semantically important thermal signatures of objects of interest.

Infrared image coding methods have been investigated, as well as approaches to semantically-oriented processing using artificial intelligence models. The feasibility of using a metric assessment of the informativeness of segments in combination with intelligent detection of objects of interest has been substantiated.

The goal of the dissertation research is formulated, which is to develop a method for encoding infrared images (IR images) to reduce the bit rate without losing thermal integrity based on semantic-oriented processing using artificial intelligence (AI) models.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Develop a method for forming a two-layer informative map of IR images to ensure conditions for reducing the bit rate with a certain thermal integrity based on the use of AI models.

2. Create a method for spectral-group compression of segments of bit layers of IR images to reduce the bit volume without losing thermal integrity

3. Develop a method for semantic-oriented encoding of IR images for transmission in information systems.

4. Create a method for increasing the thermal integrity of object-informative segments of IR images without losing bit rate in information systems.

5. To carry out a comparative assessment of methods for encoding IR images using the ablation technique.

The object of the research is the processes of reducing the bit volume of IR frames in information and intelligent systems.

The subject of the research is methods of encoding infrared images to reduce the bit load of data channels in information and intelligent systems.

The characteristics of IR streams generated by modern devices have been studied. Deficiencies in processing IR frames using existing encoding methods have been identified. Limitations of special IR codecs and common neural network approaches have been identified.

A method of bifurcation of bit layers of a frame with an extended dynamic range has been developed. The method allows dividing the information structure of

an image into significant and background components at the levels of individual bit layers. This approach allows reducing the spatial redundancy of the frame.

A method for determining the metric of segment information has been developed. This allows for a quantitative assessment of the information content of spatial regions based on their texture saturation.

A method for forming a two-layer information map of an infrared frame has been developed. The method allows for the identification of priority processing areas in the threshold-metric space of the senior and junior bit layers.

A method for detecting object-information segments based on the use of artificial intelligence models has been developed. This allows for segmenting objects of interest through the conjunction of the result of a neural network with the formed information content map. This approach allows for limiting the level of distortion in priority regions of the frame.

A method for differential coding has been developed for the formation of mini-segments with a reduced dynamic range. This allows for the transformation of the values of IR frame pixels into local temperature deviations.

A method for correcting low-frequency coefficients based on high-frequency components of the wavelet transform has been developed. The method allows to narrow the dynamic range of low-frequency values without introducing additional distortions.

An adaptive quantization method has been developed based on the level of information content and bit layer of segments. The method allows to differentially distribute quantization coefficients depending on the priority of segments. This solution allows to limit the bit rate of the IR stream at a set level of thermal integrity.

A method of spectral-group coding of segments has been developed. The method allows to carry out structural coding of spectral values by types of frequency

groups under conditions of quadrodecomposition. The use of this approach narrows the amount of bit excess and reduces the intensity of the data stream.

An ablative analysis of the impact of the developed methods on the coding of IR frames was carried out. It was shown that the complex integration of the proposed methods cumulatively reduces the bit volume of data while preserving the integrity of informative areas.

Scientific novelty of the main research results.

1. The method for constructing a two-layer informative map based on threshold decision rules was improved. The differences of the method lie in the definition of adaptive associative dependencies in the threshold-metric space based on the aggregation and normalization of information of the high-frequency region of the Haar transform for segmented bit layers of IR images. This allows creating conditions for increasing the compression level with the established requirements for the thermal integrity of IR images.

2. Further development of the method for detecting areas of objects of interest based on the application of an artificial intelligence model was obtained. The differences of the method are in the detection of object-informative segments due to the conjunction of the result of the neural network with the formed informative map. This allows to preserve the thermal integrity of the objects of interest under conditions of limited bitrate.

3. For the first time, a spectral-group compression method was developed based on structural transformations in the Haar wave space. The differences of the method are: differentiated structural coding of the wave space of segments by frequency domains under conditions of quadrodecomposition and setting the lower limit of the high-frequency domain. This allows to reduce the bit volume of layer segments of IR images without loss of thermal integrity.

4. Further development of the IR image coding method based on semantic-oriented processing was obtained. The differences of the method lie in spectral-group coding taking into account the presence of object-informative segments of IR images in the Haar bifurcation-wave space. This allows to reduce the bit rate of the infrared data stream with a certain level of thermal integrity during processing and transmission in information systems.

5. The method of restoring compressed IR images based on the use of biharmonic functions has been improved. The differences of the method lie in the spatial thinning of low-informative areas of bit layers of IR images with their regeneration according to a regular spatial template in the process of restoration using biharmonic functions. This allows to increase the level of thermal integrity of informative segments of IR images without loss of bit rate.

Practical significance of the research results obtained.

Implementation of the developed method of encoding IR images in information systems allows to reduce the bit rate of the thermal frame stream within the given thermal integrity, i.e.:

- by 8% for frames with a predominant content of low-informative background segments;
- by 10% for frames with a predominant content of informative segments containing thermal contrasts;
- by 7% for frames with a predominant content of object-informative segments, saturated with thermal signatures of objects of interest.

For the developed method, an advantage is achieved in the use of artificial intelligence over existing ones. This allows to increase SSIM for object areas by 93% compared to existing methods. Which satisfies the requirements for preserving the integrity of thermal fields of objects of interest.

The use of artificial intelligence in combination with the metric definition of the information class of segments makes it possible to use selective quantization coefficients when encoding bit layers. This allows you to adjust the PSNR from 24 dB to 38 dB, which provides an advantage in the compression ratio of 4-10% over existing methods.

Biharmonic reconstruction of low-information regions of the IR frame allows to increase the compression ratio by 6%, while reducing the mean square deviation in local regions.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, neural networks, information security, secure data exchange model, semantic segmentation, cryptoresistance, object detection, wavelet transform, computational complexity, image coding, image compression, computer vision, infrared images, digital image processing.