



DOI: 10.36023/ujrs.2020.27.175

УДК 528.854.4:519.254

## Адаптація нейромережевих технологій до ідентифікації малорозмірних об'єктів на супутникових зображеннях недостатньої розрізненості в базі графічних еталонів

С. А. Станкевич<sup>1\*</sup>, О. В. Масленко<sup>2</sup>, В. В. Андронов<sup>2</sup><sup>1</sup> ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. О. Гончара 55 Б, Київ 01054, Україна<sup>2</sup> Науково-дослідний інститут МО України, вул. Ю. Ілленка 81, Київ 04050, Україна

Запропоновано нову схему ідентифікації малорозмірних об'єктів на супутникових зображеннях недостатньої розрізненості в базі графічних еталонів із застосуванням нейромережевих технологій на основі компромісної контрадикції — одночасного підвищення розрізненості об'єктового сегмента вхідного зображення та приведення розрізненості еталонного зображення до спільної розрізненості через моделювання знімальної системи. Необхідність цього обумовлюється суттєвою розбіжністю між розрізненостями вхідного зображення та графічних еталонів, що використовуються для ідентифікації. Потрібний рівень підвищення розрізненості для супутникових зображень, як правило, недосяжний, а значне закруглення еталонів небажане, оскільки приводить до помилок ідентифікації. Отже для ідентифікації застосовується певна проміжна просторова розрізненість, яку, з одного боку можливо отримати, а з іншого — втрати інформації, що міститься в еталоні, ще поки прийнятні. Визначення проміжної розрізненості здійснюється шляхом моделювання процесу отримання зображень супутниковою знімальною апаратурою. Для полегшення такого моделювання варто виконувати його в просторово-частотній області, де існує розвинений апарат Фур'є-аналізу і, як правило, відомі всі необхідні передавальні властивості ланок тракту формування зображень. Для проведення ідентифікації задіяно три основні функціональні елементи: штучна нейронна мережа підвищення розрізненості вхідних зображень, модуль просторово-частотного моделювання супутникового знімання графічного еталону та штучна нейронна мережа порівняння покращеного об'єктового сегмента з модельними зображеннями еталонів. Можливість реалізації викладеного підходу продемонстровано на прикладі успішної ідентифікації зображення морського судна на супутниковому знімку SPOT-7. Зараз проводяться роботи з порівняння продуктивності різноманітних нейромережевих платформ для ідентифікації малорозмірних об'єктів на супутникових зображеннях та з оцінки досяжної точності.

**Keywords:** супутникове зображення, малорозмірний об'єкт, просторова розрізненість, база графічних еталонів, підтримка дешифрування, нейромережеві технології

© С. А. Станкевич, О. В. Масленко, В. В. Андронов. 2020

### 1. Вступ

В теперішній час спостерігається вибухове розширення застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) в розпізнаванні зображень. У багатьох практичних задачах, таких як розпізнавання дорожньої обстановки, ідентифікація особи по зображенню, перетворення зображення символів на текст і багатьох інших отримано досить надійні результати (Rawat and Wang, 2017). Більшість використовуваних на практиці нейромереж мають багатшарову згортальну архітектуру (Татьянкін, 2016).

Не зважаючи на успіхи автоматичного розпізнавання зображень, в дешифруванні супутникових сцен з малорозмірними антропогенними об'єктами основним інструментом залишається візуальна інтерпретація (Абрамов та ін., 2018). Проте, впровадження автоматизованих систем підтримки дешифрування здатне суттєво покращити оперативність одержання корисної інформації (Лаврінчук, Гринюк, Ракушев, 2017). При цьому важливу роль грає можливість швидко забезпечити оператора еталонними зображеннями чи схемами малорозмірних антропогенних об'єктів, що де-

шифруються. Проблема полягає в тому, що детальність навіть супутникових зображень надвисокої розрізненості, як правило, недостатня для впевненої візуальної інтерпретації певних типів малорозмірних об'єктів (Schachter, 2018).

### 2. Задача

Полегшити та прискорити процес дешифрування малорозмірних об'єктів на супутниковому зображенні недостатньої розрізненості можливо шляхом своєчасного автоматичного пред'явлення оператору графічного еталону або кількох близьких еталонів того об'єкта, що розглядається, з бази еталонних зображень достатньої розрізненості (Stankevich and Maslenko, 2019). Ідентифікація поточного зображення в базі еталонних зображень — одне з класичних застосувань нейромережевих технологій розпізнавання (Маркова, Жигалов, 2017). Але в даному конкретному випадку задача суттєво ускладнюється значною неузгодженістю просторової розрізненості вхідного зображення, що підлягає ідентифікації, та графічних еталонів: розрив може сягати десятків і сотень разів, оскільки розрізненість супутникового знімання майже завжди лежить на межі виявлення типових малорозмірних об'єктів (Станкевич, Шкляр, 2005).

\* E-mail: [st@casre.kiev.ua](mailto:st@casre.kiev.ua)<https://orcid.org/0000-0002-0889-5764>

### 3. Метод

Сама по собі неузгодженість просторових розрізненностей аналізованого та еталонного зображень не є проблемою: сучасні неймережеві методи, насамперед Single Image Superresolution, здатні підвищувати формальну розрізненність зображень в кілька разів (Dong et al., 2016). У порівнянні з класичними методами інтерполяції (бікубічна, метод найближчого сусіда), статистичними та іншими методами підвищення розрізненності (Elham et al., 2014; Piestova et al., 2017), методи на основі нейронних мереж демонструють вищу ефективність. В той же час навчання таких мереж вимагає значно більше часу — від кількох годин до 2 тижнів (Wang et al., 2018). Але достовірне підвищення розрізненності в десятки разів поки що недосяжне. Тому пропонується застосувати компромісну контрадикцію: підвищувати розрізненність вхідного зображення до можливого рівня (який буде все одно нижчим за розрізненність графічних еталонів), а розрізненність еталонного зображення, у свою чергу, понижувати до того ж самого проміжного рівня. Порядок такої зустрічно-спрямованої обробки пояснюється схемою на Рис. 1.

На вхідному супутниковому зображенні визначається об'єктовий сегмент, що містить зображення малорозмірного об'єкта знімання. До цього сегмента застосовується процедура підвищення розрізненності за допомогою спеціальної нейронної мережі підвищення розрізненності, в результаті чого отримується об'єктовий сегмент підвищеної розрізненності. Водночас, спираючись на характеристики знімальної апаратури та умови знімання, які входять до метаданих знімання за допомогою спеціальної процедури моделювання знімання наявні в базі графічні еталони перетворюються на модельні зображення тієї ж самої знімальної апаратури, якою отримано вхідне зображення — еталонні сегменти. Відтепер стає можливим використання нейронної мережі розпізнавання зображення малорозмірного об'єкта підвищеної розрізненності серед модельних зображень еталонних сегментів (Tang et al., 2020), за результатами якого визначається той з графічних еталонів, що відповідає малорозмірному об'єкту — ідентифікований еталон. Ідентифікацію виконано. Важливою умовою працездатності описаної схеми ідентифікації є узгодженість процедур підвищення розрізненності та моделювання знімання за розрізненністю, що позначено на Рис. 1 пунктирною лінією.

Однією з особливостей неймережевих технологій є потреба у великій кількості (десятки і сотні тисяч) прикладів правильного розпізнавання об'єктів для навчання мережі (Кафтанников, Парасич, 2016). Для реальних супутникових зображень, яка правило, така кількість приладів недо-

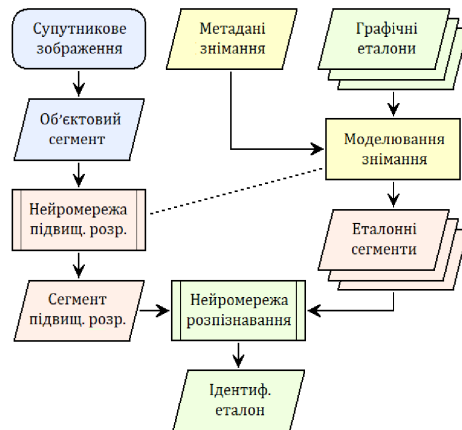


Рис. 1. Схема ідентифікації малорозмірних об'єктів на супутниковому зображенні

сяжна. Тут може допомогти процедура моделювання зйомки зі схеми Рис. 1: за її допомогою можливо згенерувати необхідну кількість навчальних зображень для різних еталонних об'єктів і різних умов знімання. Більш того, оскільки характеристики, перш за все — розрізненність, знімальної апаратури різних супутникових систем можуть суттєво відрізнятися, доцільно застосовувати окремі ланцюжки навчання-розпізнавання для них, тим паче, що анотаційна інформація про застосовану супутникову систему завжди доступна.

В практиці неймережевих технологій існує можливість поєднання функцій неймереж SRNN та IRNN в єдиній спільній нейронній мережі (Maggiore et al., 2017) для економії ресурсів, але це буде невиправдано при великому різноманітті супутникових знімальних систем.

### 4. Результат

Для експерименту було використано матеріали космічної зйомки супутника SPOT-7 просторової розрізненності 1.5 метри. Вищеописаний метод було застосовано до наявного на супутниковому знімку (Рис. 2 а) морського судна. На першому етапі роботи методу, спеціальною нейронною мережею SRNN було застосовано процедуру підвищення просторової розрізненності об'єктового сегменту зображення у 2 рази (Рис. 2 б). Для підвищення розрізнення було обрано глибоку згортальну нейронну мережу EDSR (Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution) (Lim et

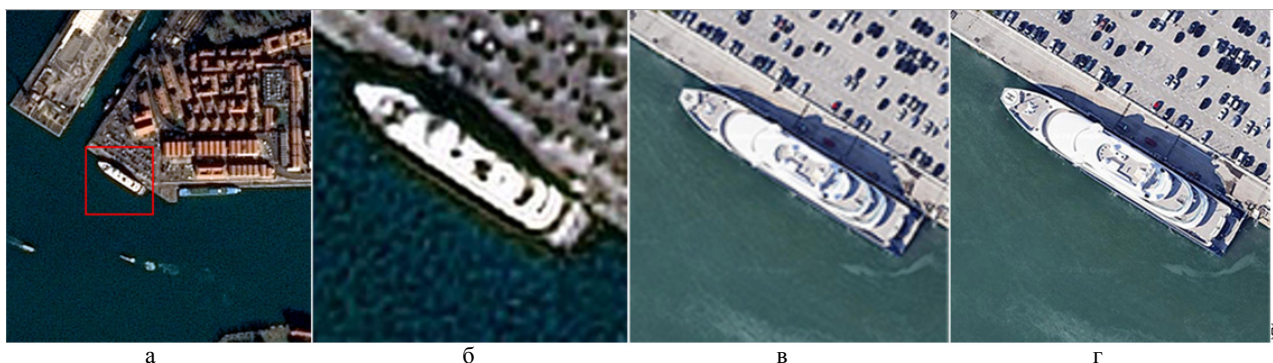


Рис. 2. Приклад застосування методу до реального супутникового зображення:

а — вхідне зображення; б — сегмент вхідного зображення підвищеної розрізненності; в — зменшене модельне зображення; г — еталонне зображення

al., 2017). Навчання проводилось на протязі 2 дб з використанням графічного адаптера NVidia GeForce GTX 1060 6 GB на 50 супутникових зображеннях з відкритих джерел (<https://earth.google.com/web>, <https://www.maxar.com/open-data>), які було розділено на 8000 фрагментів розміром 120 × 120 пікселів. Наступним кроком, з врахуванням умов знімання, взятих з метаданих супутникового знімка, та характеристик знімальної апаратури супутника Spot-7, в базі графічних еталонів, наявні об'єкти піддавались процедурі моделювання зйомки. Спеціальна нейронна мережа розпізнавання малорозмірних об'єктів IRNN порівнювала зменшене модельне зображення (Рис. 2 в) графічного еталону (Рис. 2 г) із зображенням об'єкту підвищеної розрізненності (Рис. 2 б). На вхідному супутниковому зображенні визначається об'єктовий сегмент, що містить зображення малорозмірного об'єкта знімання. До цього сегмента застосовується процедура підвищення розрізненності за допомогою спеціальної нейронної мережі підвищення розрізненності, в результаті чого отримується об'єктовий сегмент підвищеної розрізненності. Водночас, спираючись на характеристики знімальної апаратури та умови знімання, які входять до метаданих знімання за допомогою спеціальної процедури моделювання знімання наявні в базі графічні еталони перетворюються на модельні зображення тієї ж самої знімальної апаратури, якою отримано вхідне зображення — еталонні сегменти. Відтепер стає можливим використання нейронної мережі розпізнавання зображення малорозмірного об'єкта підвищеної розрізненності серед модельних зображень еталонних сегментів (Tang et al., 2020), за результатами якого визначається той з графічних еталонів, що відповідає малорозмірному об'єкту — ідентифікований еталон. Ідентифікацію виконано. Важливою умовою працездатності описаної схеми ідентифікації є узгодженість процедур підвищення розрізненності та моделювання знімання за розрізненністю, що позначено на Рис. 1 пунктирною лінією. За результатами розпізнавання на знімку, зробленому супутником Spot-7, в базі графічних еталонів ідентифіковано морське судно — яхту розмірами 97 метрів завдовжки та 16 метрів завширшки.

Варто відзначити, що без застосування неузгоджених за розрізненністю зображень об'єкта та графічних еталонів ідентифікація ускладнена, недостовірна або взагалі неможлива.

## 5. Висновки

Для пришвидшення дешифрування малорозмірних об'єктів на супутниковому зображенні та забезпечення оператора відповідними графічними еталонами, запропоновано застосовувати компромісну контрадикцію: підвищувати розрізненність вхідного зображення за допомогою спеціальної нейронної мережі підвищення розрізненності, а розрізненність наявних в базі графічних еталонів понижати з урахуванням передавальних властивостей знімальної апаратури супутникової системи, після чого порівнювати зведені до єдиної просторової розрізненності зображення малорозмірного об'єкта та еталонів за допомогою іншої — розпізнавальної — нейронної мережі.

Подальші дослідження доцільно зосередити на удосконаленні відомих нейромережових методів підвищення розрізненності супутникових зображень або на розробці нових методів з урахуванням додаткових (анотаційних, контекстуальних, просторово-частотних, фізичних та інших) даних. Також суттєвого удосконалення потребують методи розпізнавання малорозмірних об'єктів на зашумлених супутнико-

вих зображеннях недостатньої розрізненності за геометричними ознаками, перед усім — формою контуру та помітних деталей об'єкта.

## Література

- Абрамов Н. С., Макаров Д. А., Талалаев А. А., Фраленко В. П. Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ. *Программные системы: теория и приложения*. 2018. Т. 9, № 4. С. 417–442.
- Кафтаников И. Л., Парасич А. В. Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения. *Вестник ЮУрГУ. Серия “Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника”*. 2016. Т. 16, № 3. С. 15–24.
- Лаврінчук О. В., Гринюк С. В., Ракушев М. Ю. Аналіз технологій дешифрування космічних знімків. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2017. Т. 30, № 3. С. 45–49.
- Маркова С. В., Жигалов К. Ю. Применение нейронной сети для создания системы распознавания изображений. *Фундаментальные исследования*. 2017. Т. 8, № 1. С. 60–64.
- Станкевич С. А., Шкляр С. В. Оптимізація параметрів видової аерознімальної апаратури за умовою максимуму середньої імовірності виявлення об'єктів на зображенні. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2005. Т. 8, № 2. С. 133–136.
- Татьянкин В. М. Подход к формированию архитектуры нейронной сети для распознавания образов. *Вестник Югорского государственного университета*. 2016. Т. 2, № 41. С. 61–64.
- Dong C., Loy C. C., He K. and Tang X. Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2016. Vol. 38, No 2. P. 295–307.
- Maggiori E., Charpiat G., Tarabalka Y. and Alliez, P. Recurrent neural networks to correct satellite image classification maps. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017. Vol. 55, No 9. P. 4962–4971.
- Piestova I., Stankevich S., & Kostolny J. Multispectral imagery superresolution with logical reallocation of spectra. *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT 2017)*, 322–326. Žilina: IEEE.
- Rawat W., Wang Z. Deep convolutional neural networks for image classification: *A comprehensive review*. *Neural Computation*. 2017. Vol. 29, No. 9. P. 2352–2449.
- Schachter B. J. *Automatic Target Recognition*. Bellingham: SPIE Press, 2018.
- Stankevich S. A., Maslenko O. V. Automated identification of compact target samples in aerospace imagery visual interpretation support system. Abstracts of the III Scientific conference “Aerospace Technologies in Ukraine: Problems and Prospects”. Kiev: NSFCTC, 2019. P. 33–34.
- Tang C., Zhu Q., Wu W., Huang W., Hong C. and Niu X. PLANET: Improved convolutional neural networks with image enhancement for image classification. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. No 20. P. 1245924.
- Wang X., Yu K., Wu, S., Gu J., Liu Y., Don, C., Qiao Y., & Loy C.C. ESRGAN: enhanced super-resolution generative adversarial networks. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 2018)*, 63–79. Cham: Springer.

## References

- Abramov, N. S., Makarov D. A., Talalaeв A. A., Fralenko, V. P. (2018). Modern methods of intelligent processing of remote sensing data. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 9 (4), 417–442. (in Russian).



- Dong, C., Loy, C.C., He, K., & Tang, X. (2016). Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38 (2), 295–307.
- Elham, K., Kaveh, K., & Javadi, S. (2014). A survey on super-resolution methods for image reconstruction. *International Journal of Computer Applications*, 90 (3), 32–39
- Kaftannikov, I. L., Parasich, A.V. (2016). Problems of forming a training sample in machine learning tasks. *Vestnik YuUrGU. Seriya Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 16 (3), compact target samples in aerospace imagery visual interpretation support system. Abstracts of the III Scientific Conference Aerospace Technologies in Ukraine: Problems and Prospects, 33–34. Kiev: NSFCTC.
- Lavrinchuk, O.V., Hryniuk, S.V. & Rakushev, M.Yu. (2017). Analysis of the technology of space images decryption. *Suchasni informacijni tekhnologhiji u sferi bezpeky ta oborony*, 30 (3), 45-49. (in Ukrainian).
- Lim, B., Son, S., Kim, H., Nah, S., & Lee, K.M. (2017). Enhanced deep residual networks for single image super-resolution. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017)*, 136-144. Honolulu: IEEE.
- Maggiore, E., Charpiat, G., Tarabalka, Y. & Alliez, P. (2017). Recurrent neural networks to correct satellite image classification maps. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55 (9), 4962-4971.
- Markova, S.V. & Zhigalov, K.Yu. (2017). Neural network application for purposes of recognition of images. *Fundamentalnye issledovaniya*, 8 (1), 60-64. (in Russian).
- Piestova, I., Stankevich, S., & Kostolny, J. (2017). Multispectral imagery superresolution with logical reallocation of spectra. *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT 2017)*, 322–326. Žilina: IEEE.
- Rawat, W. & Wang, Z. (2017). Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review. *Neural Computation*, 29 (9), 2352–2449.
- Schachter, B.J. (2018). *Automatic Target Recognition*. Bellingham: SPIE Press.
- Stankevich, S. A., Shklyar, S. V. (2005). Optimization of the parameters of the species aerial photography equipment under the condition of the maximum average probability of detection of objects in the image. *Zbirnyk naukovykh prac Derzhavnogo naukovodo-doslidnogo instytutu aviaciji*, 8 (2), 133–136. (in Ukrainian).
- Stankevich, S.A. & Maslenko, O.V. (2019). Automated identification of compact target samples in aerospace imagery visual interpretation support system. Abstracts of the III Scientific Conference “Aerospace Technologies in Ukraine: Problems and Prospects”, 33-34. Kiev: NSFCTC.
- Tang, C., Zhu, Q., Wu, W., Huang, W., Hong, C. and Niu, X. (2020). PLANET: Improved convolutional neural networks with image enhancement for image classification. *Mathematical Problems in Engineering*, 20, 1245924.
- Tatyankin, V. M. (2016). An approach to the formation of a neural network architecture for pattern recognition. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2 (41), 61–64. (in Russian).
- Wang, X., Yu, K., Wu, S., Gu, J., Liu, Y., Dong, C., Qiao, Y., & Loy, C.C. (2018). ESRGAN: enhanced super-resolution generative adversarial networks. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 2018)*, 63–79. Cham: Springer.

#### NEURAL NETWORK TECHNOLOGY ADAPTATION TO THE SMALL-SIZE OBJECTS IDENTIFICATION IN SATELLITE IMAGES OF INSUFFICIENT RESOLUTION WITHIN THE GRAPHIC REFERENCE IMAGES DATABASE

Sergey A. Stankevich, Oleh V. Maslenko, Vitalii V. Andronov

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. 55B, O. Gonchar st., Kyiv, Ukraine, 01054

A novel flowchart for small-size objects identification in satellite images of insufficient resolution within the graphic reference images database using neural network technology based on compromise contradiction, i.e. simultaneously the resolution enhancement of the object segment of input image and the resolution reduction of the reference image to joint resolution through the simulation of the imaging system has been proposed. This is necessary due to a significant discrepancy between the resolutions of the input image and the graphic reference images used for identification. The required level of resolution enhancement for satellite images, as a rule, is unattainable, and a significant coarsening of reference images is undesirable because of identification errors. Therefore, a certain intermediate spatial resolution is used for identification, which, on the one hand, can be obtained, and on the other the loss of information contained in the reference image is still acceptable. The intermediate resolution is determined by simulating the process of image acquisition with satellite imaging system. To facilitate such simulation, it is advisable to perform it in the frequency domain, where the advanced Fourier analysis is available and, as a rule, all the necessary transfer properties of the links of image formation chain are known. Three main functional elements are engaged for identification: an artificial neural network for the resolution enhancement of input images, a module of frequency-domain simulating of the graphical reference satellite imaging and an artificial neural network for comparing the enhanced object segment with the reference model images. The feasibility of the described approach is demonstrated by the example of successful identification of the sea vessel image in the SPOT-7 satellite image. Currently, the works are under way to compare the performance of a neural network platforms variety for small-size objects identification in satellite images as well as to assess achievable accuracy.

**Keywords:** satellite image, small-size object, spatial resolution, graphic reference images database, image interpretation support, neural network technology

#### АДАПТАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ИДЕНТИФИКАЦИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ НЕДОСТАТОЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ В БАЗЕ ГРАФИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ

С. А. Станкевич, О. В. Масленко, В. В. Андронов

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, ул. Олеся Гончара 55-Б, Киев, Украина, 01054

Предложена новая схема идентификации малоразмерных объектов на спутниковых изображениях недостаточного разрешения в базе графических эталонов с применением нейросетевых технологий на основе компромиссной contradикции – одновременного повышения разрешения объектового сегмента входного изображения и приведения разрешения эталонного изображения к общему разрешению через моделирование съёмочной системы. Необходимость этого обуславливается существенным расхождением между разрешениями входного изображения и графических эталонов, используемых для идентификации. Требуемый уровень повышения разрешения для спутниковых изображений, как правило, недостижим, а значительное закругление эталонов нежелательно, поскольку приводит к ошибкам идентификации. Поэтому для идентификации применяется определённое промежуточное пространственное разрешение, которое, с одной стороны возможно получить, а с другой — потери информации, содержащейся в эталоне, пока ещё приемлемы. Определение промежуточного разрешения осуществляется путём моделирования процесса получения изображений спутниковой съёмочной

аппаратурой. Для облегчения такого моделирования целесообразно выполнять его в пространственно-частотной области, где имеется развитый аппарат Фурье-анализа и, как правило, известны все необходимые передаточные свойства звеньев тракта формирования изображений. Для проведения идентификации задействованы три основных функциональных элемента: искусственная нейронная сеть повышения разрешения входных изображений, модуль пространственно-частотного моделирования спутниковой съёмки графического эталона и искусственная нейронная сеть сравнения улучшенного объектового сегмента с модельными изображениями эталонов. Возможность реализации изложенного подхода продемонстрирована на примере успешной идентификации изображения морского судна на спутниковом снимке SPOT-7. В настоящее время проводятся работы по сравнению производительности разнообразных нейросетевых платформ для идентификации малоразмерных объектов на спутниковых изображениях и по оценке достижимой точности.

**Ключевые слова:** спутниковое изображение, малоразмерный объект, пространственное разрешение, база графических эталонов, поддержка дешифрирования, нейросетевые технологии

*Рукопис статті отримано 28.08.2020*