

ABSTRACT AND REFERENCES

INFORMATION AND CONTROLLING SYSTEM

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351685

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF TRANSACTION CLASSIFICATION IN THE BITCOIN NETWORK USING AN ATTENTION MECHANISM IN GRAPH NEURAL NETWORKS (p. 6–18)

Oleksandr Kushnerov

Sumy State University, Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8253-5698>**Vladyslav Prosolov**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1276-4828>**Valerii Dudykevych**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8827-9920>**Serhii Yevseiev**National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1647-6444>**Serhii Povaliaiev**Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv,
UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-0132>**Yevheniia Ivanchenko**State University of Information and Communication Technologies,
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3017-5752>**Volodymyr Gorbulyk**

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>**Oleksandr Chechui**Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7584-4457>**Dmytro Balagura**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9839-3317>**Vladyslav Sukhoteplyi**Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2566-4167>

The object of the study is the processes of automated transaction classification and Bitcoin address identification for detecting malicious activity in conditions of pseudo-anonymity. The problem is the insufficient effectiveness of algorithms, such as graph convolutional networks, in conditions of strong class imbalance. This discovery is particularly important when less than ten percent of the data is clearly labelled. However, the main difficulty is excessive feature smoothing, which complicates the effective detection of anomalies for dense graphs. The results confirm that the Graph Attention Network v2 (GATv2) model is effective. It achieves an accuracy of 91.19% and an F1 score of 91.11% in testing. In addition, the stability of the approach is confirmed when 15% of topological noise is added to the graph structure. To prove the selectivity of the classifier, the Area Under the Curve (AUC) value of the approach is 0.889. The results are explained by the implementation of a dynamic anisotropic aggrega-

tion mechanism that adaptively distributes attention weights. This allows selectively amplifying weak signals of suspicious transactions while ignoring irrelevant connections and noise. A distinctive feature is the model of feature unification through logarithmic normalization of sums and non-linear processing of time intervals. Its uniqueness lies in the use of weighted loss functions and active learning strategies on boundary samples. Two-level transfer learning was applied to the Elliptic and BitcoinHeist datasets. The area of application is integration into real-time anti-money laundering (AML) systems. The approach allows overcoming conceptual shifts when new types of cyber threats emerge. The method detects the activity of CryptoLocker-type extortionists in the absence of data.

Keywords: blockchain, BitcoinHeist, GATv2, graph neural networks, transfer learning, active learning.

References

1. Akcora, C. G., Li, Y., Gel, Y. R., Kantarcioglu, M. (2020). BitcoinHeist: Topological Data Analysis for Ransomware Prediction on the Bitcoin Blockchain. Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 4439–4445. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/612>
2. Weber, M., Domeniconi, G., Chen, J., Weidele, D. K. I., Bellei, C., Robinson, T., Leiserson, C. E. (2019). Anti-Money Laundering in Bitcoin: Experimenting with Graph Convolutional Networks for Financial Forensics. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.02591>
3. Bitcoin Heist Ransomware Address [Dataset] (2020). UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C5BG8V>
4. Lorenz, J., Silva, M. I., Aparício, D., Ascensão, J. T., Bizarro, P. (2020). Machine learning methods to detect money laundering in the bitcoin blockchain in the presence of label scarcity. Proceedings of the First ACM International Conference on AI in Finance, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3383455.3422549>
5. Vassallo, D., Vella, V., Ellul, J. (2021). Application of Gradient Boosting Algorithms for Anti-money Laundering in Cryptocurrencies. SN Computer Science, 2 (3). <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00558-z>
6. Alarab, I., Prakoonwit, S., Nacer, M. I. (2020). Competence of Graph Convolutional Networks for Anti-Money Laundering in Bitcoin Blockchain. Proceedings of the 2020 5th International Conference on Machine Learning Technologies, 23–27. <https://doi.org/10.1145/3409073.3409080>
7. Kipf, T. N., Welling, M. (2016). Semi-supervised classification with graph convolutional networks. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.02907>
8. Veličković, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Lio, P., Bengio, Y. (2017). Graph attention networks. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10903>
9. Brody, S., Alon, U., Yahav, E. (2021). How attentive are graph attention networks? arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.14491>
10. Li, G., Tang, X. (2024). Exploring GCN, GAT, and GIN Fusion for Illicit Transaction Classification in Cryptocurrency Networks. Proceedings of the 2024 the 12th International Conference on Information Technology (ICIT), 49–53. <https://doi.org/10.1145/3718391.3718399>
11. Rezik, S., Mehmood, S. (2025). A Hybrid Graph Neural Network and Neural ODE Model to Intrusion Detection in Dynamic Network Topologies. IEEE Access, 13, 198201–198227. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3635385>
12. Zhao, H., Liu, W., Gao, C., Shi, W., Zhang, Z., Chen, J. (2025). HGAA: A Heterogeneous Graph Adaptive Augmentation Method for Asymmetric Datasets. Symmetry, 17 (10), 1623. <https://doi.org/10.3390/sym17101623>

13. Luša, R., Pintar, D., Vranić, M. (2025). TE-G-SAGE: Explainable Edge-Aware Graph Neural Networks for Network Intrusion Detection. *Modelling*, 6 (4), 165. <https://doi.org/10.3390/modelling6040165>
14. H. G., M., Kumar, J., Mm, N. (2025). GrMA-CNN: Integrating Spatial-Spectral Layers with Modified Attention for Botnet Detection Using Graph Convolution for Securing Networks. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 18 (1), 1009. <https://doi.org/10.22266/ijies2025.0229.72>
15. Hamilton, W., Ying, Z., Leskovec, J. (2017). Inductive representation learning on large graphs. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02216>
16. Ding, K., Li, J., Bhanushali, R., Liu, H. (2019). Deep Anomaly Detection on Attributed Networks. *Proceedings of the 2019 SIAM International Conference on Data Mining*, 594–602. <https://doi.org/10.1137/1.9781611975673.67>
17. Lo, W. W., Kulatilleke, G. K., Sarhan, M., Layeghy, S., Portmann, M. (2023). Inspection-L: self-supervised GNN node embeddings for money laundering detection in bitcoin. *Applied Intelligence*, 53 (16), 19406–19417. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-04504-9>
18. Ma, X., Wu, J., Xue, S., Yang, J., Zhou, C., Sheng, Q. Z. et al. (2023). A Comprehensive Survey on Graph Anomaly Detection With Deep Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35 (12), 12012–12038. <https://doi.org/10.1109/tkde.2021.3118815>
19. Elliptic Data Set. Kaggle. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/ellipticco/elliptic-data-set>
20. Ren, P., Xiao, Y., Chang, X., Huang, P.-Y., Li, Z., Gupta, B. B. et al. (2021). A Survey of Deep Active Learning. *ACM Computing Surveys*, 54 (9), 1–40. <https://doi.org/10.1145/3472291>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351181

DEVISING A METHOD FOR COMPLEX STEGANOGRAPHIC EMBEDDING OF INFORMATION IN THE STRUCTURAL-PSYCHOVISUAL SPACE (p. 19–30)

Vladimir Barannik

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2848-4524>

Dmitry Barannik

Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-9864>

Mykhailo Babenko

Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1013-9383>

Rodion Prokopenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0789-9073>

Oleksandr Akimov

Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9557-2276>

Nina Petrukha

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3805-2215>

This study examines the set of processes aimed at improving the efficiency of steganographic methods for information protection, while ensuring a specified level of integrity and timeliness of transmission in infocommunication systems. The work addresses a scientific and applied task of increasing the level of information security while maintaining a specified level of integrity and timely delivery of data from unmanned aerial systems (UASs). It relates to the existence of a contradiction between ensuring the confidentiality of video information and the efficiency of its delivery with a given integrity.

In the process of research, a method for structural steganographic embedding has been devised, based on changing the values of positional basis (PB). The difference is the embedding of information in the process of modifying the PB values, taking into account the detection of structural dependences in the spectrally modified space of a video container (VC). Such transformations are carried out under conditions of reducing the influence of spectral space modifications on the compression level. The above advantages make it possible to build a comprehensive method of steganographic transformations in the process of VC compression.

The method is distinguished by two principal aspects. The first is the use of a sequence of steganographic transformations in independent spaces to detect dependences that are used in the process of embedding information. The second is that information is embedded in the structural-spectral space, taking into account its modification by the youngest bits. This enables increasing the level of steganographic capacity by an average of 7% without distorting the integrity of the stego-containers and removing hidden information on the receiving side.

The devised method is intended to be used to improve the confidentiality, efficiency, and integrity of video information delivery from unmanned systems.

Keywords: unmanned aerial systems, infocommunication systems, video-container, redundancy, structural dependences, positional basis.

References

1. Barannik, V., Lytvinenko, M., Okladnoy, D., Suprun, O. (2017). Description of the OFDM symbol with the help of mathematical laws. Analysis of technologies that were used in this case. 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 183–187. <https://doi.org/10.1109/aiact.2017.8020095>
2. Ai, D., Jiang, G., Lam, S.-K., He, P., Li, C. (2023). Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure – A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105478. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105478>
3. Sharma, R., Bollavarapu, S. (2015). Data Security using Compression and Cryptography Techniques. *International Journal of Computer Applications*, 117 (14), 15–18. <https://doi.org/10.5120/20621-3342>
4. Barannik, V., Sidchenko, S., Barannik, D., Shulgin, S., Barannik, V., Datsun, A. (2021). Devising a conceptual method for generating crypto-compression codograms of images without loss of information quality. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2 (112)), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237359>
5. Chanda D'Layla, A. W., Nevin, M., Sunardi Putra, G. G., de La Croix, N. J., Ahmad, T. (2023). Steganography in Grayscale Images: Improving the Quality of a Stego Image. 2023 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/smartgencon60755.2023.10442310>
6. Dipankar, D. (2025). Comparative Analysis Of Steganographic Techniques For Data Hiding In Digital Images. *figshare*. Journal contribution. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30621860.v1>
7. Rizal, R., Rahmatulloh, A., Widiyasono, N., R, R., Nursamsi, D. R. (2023). Steganography: Combination of Least Significant Bit (LSB) and Bit-Plane Complexity Segmentation (BPCS) Methods for Hiding Message on Image and Audio. *International Journal of Computer Applications*, 185 (21), 1–7. <https://doi.org/10.5120/ijca2023922929>
8. Hama, H. K., Ahmed, A., Hassan, B. A., Abdullah, A. A. (2025). Hybrid Encryption and Steganography for Secure Image Data Hiding. *UHD Journal of Science and Technology*, 9 (2), 287–296. <https://doi.org/10.21928/uhdjt.v9n2y2025.pp287-296>
9. Emad, E., Safey, A., Refaat, A., Osama, Z., Sayed, E., Mohamed, E. (2018). A secure image steganography algorithm based on least signifi-

cant bit and integer wavelet transform. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 29 (3), 639. <https://doi.org/10.21629/jsee.2018.03.21>

10. Ravindra, A., Bansod, S., Singh, S. K. (2025). LSB-Based Image Steganography Using Image Enlargement. 2025 International Conference on Computing Technologies (ICOCT), 1–4. <https://doi.org/10.1109/icoct64433.2025.11118799>
11. Majumder, J., Pradhan, C. (2022). An interpolation based steganographic technique with least-significant-bit and pixel value differencing in a pixel block. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27 (2), 1074. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i2.pp1074-1082>
12. Théophile, I., De La Croix, N. J., Ahmad, T. (2023). Fuzzy Logic-based Steganographic Scheme for high Payload Capacity with high Imperceptibility. 2023 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), 1–6. <https://doi.org/10.1109/isdfs58141.2023.10131727>
13. Chen, Z.-Q., Huang, Y.-H., Chen, X.-Y., Lo, S.-L. (2025). ADPGAN: Anti-Compression Attention-Based Diffusion Pattern Steganography Model Using GAN. *Electronics*, 14 (22), 4426. <https://doi.org/10.3390/electronics14224426>
14. Tan, L., Li, Y., Zeng, Y., Chen, P. (2025). An Adaptive JPEG Steganography Algorithm Based on the UT-GAN Model. *Electronics*, 14 (20), 4046. <https://doi.org/10.3390/electronics14204046>
15. Barannik, D., Barannik, V. (2022). Steganographic Coding Technology for Hiding Information in Infocommunication Systems of Critical Infrastructure. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 88–91. <https://doi.org/10.1109/atit58178.2022.10024185>
16. Gonzalez, R., Woods, R. (2018). *Digital Image Processing*. Pearson, 1022. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3227103>
17. Radosavljević, M., Brkljač, B., Lugonja, P., Crnojević, V., Trpovski, Ž., Xiong, Z., Vukobratović, D. (2020). Lossy Compression of Multispectral Satellite Images with Application to Crop Thematic Mapping: A HEVC Comparative Study. *Remote Sensing*, 12 (10), 1590. <https://doi.org/10.3390/rs12101590>
18. Barannik, V., Ryabukha, Y., Barannik, N., Barannik, D. (2020). Indirect Steganographic Embedding Method Based on Modifications of the Basis of the Polyadic System. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 699–702. <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235522>
19. Barannik, V., Shulgin, S., Barannik, N., Barannik, V. (2022). Method of Coding Subbands of Non-Homogeneous Spectrum of Video Segments in Uneven Diagonal Space. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 72–75. <https://doi.org/10.1109/atit58178.2022.10024236>
20. Ponomarenko, N., Jin, L., Jeremeiev, O., Lukin, V., Egiazarian, K., Astola, J. et al. (2015). Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives. *Signal Processing: Image Communication*, 30, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.image.2014.10.009>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.348890

DEVELOPMENT OF A HYBRID PROBABILISTIC KEY GENERATION METHOD USING MULTI-PRIME RIVEST-SHAMIR-ADLEMAN AND LEARNING WITH ERRORS TO ENHANCE HILL CIPHER SECURITY (p. 31–39)

Mahdianta Pandia

Universitas Sumatera Utara, Padang Bulan,
North Sumatera, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8390-4501>

Poltak Sihombing

Universitas Sumatera Utara, Padang Bulan,
North Sumatera, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5348-4537>

Mohammad Andri Budiman

Universitas Sumatera Utara, Padang Bulan,
North Sumatera, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7716-2206>

Erna Budhiarti Nababan

Universitas Sumatera Utara, Padang Bulan,
North Sumatera, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6368-5997>

This study focuses on the vulnerabilities of classical matrix-based encryption and asymmetric padding schemes within hybrid cryptosystems for securing high-throughput enterprise data streams. The Hill cipher algorithm is highly vulnerable to known-plaintext attacks and frequency distribution analysis, whereas the standard Rivest-Shamir-Adleman (RSA) padding scheme of public-key cryptography standards (PKCS#1 v1.5) is vulnerable to padding oracle attacks. To overcome these issues, this study proposes a hybrid cryptographic model which integrates with the key matrix probabilistic scheme (KMPS) using multi-prime RSA architecture and learning with errors (LWE), alongside a modified padding scheme (PKCS #1 v1.5e) utilizing random noises. The feature of this method is the construction of a non-deterministic key matrix combining a random base matrix with a diagonal matrix derived from multi-prime RSA parameters and interjecting Gaussian probabilistic noise. This is followed by security validation using the National Institute of Standards and Technology (NIST) Statistical Test Suite. Experimental results demonstrate that for a 10 x 10 matrix, the ciphertext achieves a P-value of 0.788 in the frequency monobit test, significantly exceeding the NIST threshold of 0.01. This means that the output is statistically indistinguishable from random noise. An avalanche effect of 50.13% is observed, demonstrating strong compliance with the avalanche criterion and indicating substantial resistance to differential cryptanalytic attacks. The internal key entropy is enhanced to 6.28 bits. This model provides a robust solution for securing sensitive database records and transaction logs in enterprise environments, as well as ensuring confidentiality without compromising computational efficiency.

Keywords: Hill cipher, multi-prime RSA, learning with errors, probabilistic encryption.

References

1. Frustaci, M., Pace, P., Aloï, G., Fortino, G. (2018). Evaluating Critical Security Issues of the IoT World: Present and Future Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5 (4), 2483–2495. <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2767291>
2. Ali, G., Dida, M. A., Elikana Sam, A. (2021). A Secure and Efficient Multi-Factor Authentication Algorithm for Mobile Money Applications. *Future Internet*, 13 (12), 299. <https://doi.org/10.3390/fi13120299>
3. Stallings, W. (2020). *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*. Pearson.
4. Hill, L. S. (1929). *Cryptography in An Algebraic Alphabet*. *The American Mathematical Monthly*, 36 (6), 306–312. <https://doi.org/10.1080/00029890.1929.11986963>
5. Lone, P. N., Singh, D., Stoffová, V., Mishra, D. C., Mir, U. H., Kumar, N. (2022). Cryptanalysis and Improved Image Encryption Scheme Using Elliptic Curve and Affine Hill Cipher. *Mathematics*, 10 (20), 3878. <https://doi.org/10.3390/math10203878>
6. Barrieta, R. G., Canlas, A. S., Cortez, D. M. A., Mata, K. E. (2022). Modified Hill Cipher Algorithm using Myszowski Transposition to address Known-Plaintext attack. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10 (4), 3242–3249. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41970>
7. Imam, R., Areeb, Q. M., Alturki, A., Anwer, F. (2021). Systematic and Critical Review of RSA Based Public Key Cryptographic

- Schemes: Past and Present Status. *IEEE Access*, 9, 155949–155976. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3129224>
8. Bleichenbacher, D. (1998). Chosen ciphertext attacks against protocols based on the RSA encryption standard PKCS #1. *Advances in Cryptology – CRYPTO '98*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/bfb0055716>
 9. Regev, O. (2009). On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography. *Journal of the ACM*, 56 (6), 1–40. <https://doi.org/10.1145/1568318.1568324>
 10. Lyubashevsky, V., Peikert, C., Regev, O. (2013). On Ideal Lattices and Learning with Errors over Rings. *Journal of the ACM*, 60 (6), 1–35. <https://doi.org/10.1145/2535925>
 11. Sabani, M. E., Savvas, I. K., Garani, G. (2024). Learning with Errors: A Lattice-Based Keystone of Post-Quantum Cryptography. *Signals*, 5 (2), 216–243. <https://doi.org/10.3390/signals5020012>
 12. Schindler, W. (2000). A Timing Attack against RSA with the Chinese Remainder Theorem. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2000*, 109–124. https://doi.org/10.1007/3-540-44499-8_8
 13. Henecka, W., May, A., Meurer, A. (2010). Correcting Errors in RSA Private Keys. *Advances in Cryptology – CRYPTO 2010*, 351–369. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14623-7_19
 14. Rivain, M. (2009). Securing RSA against Fault Analysis by Double Addition Chain Exponentiation. *Topics in Cryptology – CT-RSA 2009*, 459–480. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00862-7_31
 15. Jiang, Z., Zhou, Y., Liu, Y. (2024). New partial key exposure attacks on RSA with additive exponent blinding. *Cybersecurity*, 7 (1). <https://doi.org/10.1186/s42400-024-00214-y>
 16. Zheng, M. (2022). Revisiting the Polynomial-Time Equivalence of Computing the CRT-RSA Secret Key and Factoring. *Mathematics*, 10 (13), 2238. <https://doi.org/10.3390/math10132238>
 17. Venkatraman, S., Overmars, A. (2019). New Method of Prime Factorisation-Based Attacks on RSA Authentication in IoT. *Cryptography*, 3 (3), 20. <https://doi.org/10.3390/cryptography3030020>
 18. Tahat, N., Tahat, A. A., Abu-Dalu, M., Albadarneh, R. B., Abdallah, A. E., Al-Hazaimeh, O. M. (2020). A new RSA public key encryption scheme with chaotic maps. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10 (2), 1430. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp1430-1437>
 19. Thiziers, A. H., Cisse, H., T., J., Michel, B. (2019). Enhanced, Modified and Secured RSA Cryptosystem based on n Prime Numbers and Offline Storage for Medical Data Transmission via Mobile Phone. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10 (10). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101050>
 20. Kamardan, M. G., Aminudin, N., Che-Him, N., Sufahani, S., Khalid, K., Roslan, R. (2018). Modified Multi Prime RSA Cryptosystem. *Journal of Physics: Conference Series*, 995, 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012030>
 21. Farooq, S., Altaf, A., Iqbal, F., Thompson, E. B., Vargas, D. L. R., Diez, I. de la T., Ashraf, I. (2023). Resilience Optimization of Post-Quantum Cryptography Key Encapsulation Algorithms. *Sensors*, 23 (12), 5379. <https://doi.org/10.3390/s23125379>
 22. Libert, B., Ling, S., Nguyen, K., Wang, H. (2023). Zero-Knowledge Arguments for Lattice-Based Accumulators: Logarithmic-Size Ring Signatures and Group Signatures Without Trapdoors. *Journal of Cryptology*, 36 (3). <https://doi.org/10.1007/s00145-023-09470-6>
 23. Liang, W., Liu, Z., Zhao, X., Yang, Y., Liang, Z. (2024). Flexible and Compact MLWE-Based KEM. *Mathematics*, 12 (11), 1769. <https://doi.org/10.3390/math12111769>
 24. Kieu-Do-Nguyen, B., The Binh, N., Pham-Quoc, C., Nghi, H. P., Tran, N.-T., Hoang, T.-T., Pham, C.-K. (2024). Compact and Low-Latency FPGA-Based Number Theoretic Transform Architecture for CRYSTALS Kyber Postquantum Cryptography Scheme. *Information*, 15 (7), 400. <https://doi.org/10.3390/info15070400>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352347

IMPROVING A METHOD FOR FILTERING IMAGES ACQUIRED FROM A SPACE-BASED RADAR OBSERVATION SYSTEM BASED ON THE KUAN ALGORITHM (p. 40–46)

Hennadii Khudov

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>

Oleksandr Makoveichuk

Academician Yuri Bugai International Scientific and Technical University Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4425-016X>

Serhii Tokarev

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0141-2150>

Artem Andriushchenko

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0497-5054>

Oleksandr Pukhovyi

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2863-3374>

Olexandr Rohulia

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5338-8083>

Oleh Bilous

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

Mykola Verovok

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9932-3074>

Valeriy Samoylenko

National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0352-3953>

Vladyslav Khudov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9863-4743>

The object of this study is the process of filtering images acquired from a space radar observation system. The task to filter images from a space radar observation system has been solved by applying the Kuan algorithm.

The results reported here include the following:

- the defined basic stages of the method for filtering images acquired from a space radar observation system based on the Kuan algorithm;
- the performed experimental study on filtering images from a space radar observation system based on the Kuan algorithm.

A method for filtering images from a space radar observation system based on the Kuan algorithm has been improved. Special features of the improved method, in contrast to those in established ones, are:

- selection of a local filtering window;
- calculation of local statistical characteristics;
- calculation of variation coefficients;
- calculation of the Kuan weight coefficient;
- sequential filtering of image pixels using the “sliding” window method.

A visual analysis of radar image filtering by an improved method based on the Kuan algorithm and known methods based on the Li algorithm and Frost algorithm were carried out. The use of the improved method when filtering an image acquired from a space radar surveillance system made it possible to increase the signal-to-noise ratio. That became possible due to the use of the Kuan algorithm. The choice of the Kuan algorithm has made it possible to achieve a 21% gain in the maximum signal-to-noise ratio in comparison with the known method (based on the Li algorithm).

The scope of the improved method application includes filtering images from space radar surveillance systems. Conditions for practical implementation of the results are specialized software in software-hardware systems for processing radar images.

Keywords: space radar surveillance system, image filtering, Kuan algorithm, signal-to-noise ratio.

References

- Zhang, M., Ouyang, Y., Yang, M., Guo, J., Li, Y. (2025). ORPSD: Outer Rectangular Projection-Based Representation for Oriented Ship Detection in SAR Images. *Remote Sensing*, 17 (9), 1511. <https://doi.org/10.3390/rs17091511>
- Amitrano, D., Di Martino, G., Di Simone, A., Imperatore, P. (2024). Flood Detection with SAR: A Review of Techniques and Datasets. *Remote Sensing*, 16 (4), 656. <https://doi.org/10.3390/rs16040656>
- Hrushko, O., Zhytar, D., Ilkiv, E., Hrynishak, M., Kukhtar, D. (2025). Geospatial Analysis of War-Affected Areas in Ukraine Based on SAR and GIS Technologies. 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510159>
- Pavlikov, V., Zhyla, S., Pozdniakov, P., Kolesnikov, D., Cherepnin, H., Shmatko, O. et al. (2024). Foundations of radar synthesis theory of phantom objects formation in SAR images. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024 (4), 123–140. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.11>
- Kostenko, P. Yu., Slobodyanuk, V. V., Plahotenko, O. V. (2016). Method of image filtering using singular decomposition and the surrogate data technology. *Radioelectronics and Communications Systems*, 59 (9), 409–416. <https://doi.org/10.3103/s0735272716090041>
- Kostenko, P. Yu., Slobodyanuk, V. V., Kostenko, I. L. (2019). Method of Image Denoising in Generalized Phase Space with Improved Indicator of Spatial Resolution. *Radioelectronics and Communications Systems*, 62 (7), 368–375. <https://doi.org/10.3103/s0735272719070045>
- Kryvenko, S., Lukin, V., Vozel, B. (2024). Lossy Compression of Single-channel Noisy Images by Modern Coders. *Remote Sensing*, 16 (12), 2093. <https://doi.org/10.3390/rs16122093>
- Kryvenko, S., Rebrov, V., Lukin, V., Golovko, V., Sachenko, A., Shelestov, A., Vozel, B. (2025). Post-Filtering of Noisy Images Compressed by HEIF. *Applied Sciences*, 15 (6), 2939. <https://doi.org/10.3390/app15062939>
- Al-Bayati, M., El-Zaart, A. (2013). Automatic Thresholding Techniques for SAR Images. *Computer Science & Information Technology (CS&IT)*, 4 (3), 75–84. <https://doi.org/10.5121/csit.2013.3308>
- Tan, J., Tang, Y., Liu, B., Zhao, G., Mu, Y., Sun, M., Wang, B. (2023). A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm and Distance Block. *Remote Sensing*, 15 (10), 2690. <https://doi.org/10.3390/rs15102690>
- Hillebrand, F. L., Prieto, J. D., Mendes Júnior, C. W., Arigony-Neto, J., Simões, J. C. (2024). Gray Level Co-occurrence Matrix textural analysis for temporal mapping of sea ice in Sentinel-1A SAR images. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 96 (2). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240554>
- Zhai, Y., Liu, K., Piuri, V., Ying, Z., Xu, Y. (2016). SAR automatic target recognition based on K-means and data augmentation. Proceedings of the 2016 International Conference on Intelligent Information Processing, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3028842.3028894>
- Chen, Z., Cong, B., Hua, Z., Cengiz, K., Shabaz, M. (2021). Application of clustering algorithm in complex landscape farmland synthetic aperture radar image segmentation. *Journal of Intelligent Systems*, 30 (1), 1014–1025. <https://doi.org/10.1515/jisys-2021-0096>
- Salehi, H., Vahidi, J., Abdeljawad, T., Khan, A., Rad, S. Y. B. (2020). A SAR Image Despeckling Method Based on an Extended Adaptive Wiener Filter and Extended Guided Filter. *Remote Sensing*, 12 (15), 2371. <https://doi.org/10.3390/rs12152371>
- Rubel, O., Lukin, V., Rubel, A., Egiazarian, K. (2021). Selection of Lee Filter Window Size Based on Despeckling Efficiency Prediction for Sentinel SAR Images. *Remote Sensing*, 13 (10), 1887. <https://doi.org/10.3390/rs13101887>
- Ruban, I., Khudov, H., Makoveichuk, O., Khudov, V., Kalimulin, T., Glukhov, S. et al. (2022). Methods of UAVs images segmentation based on k-means and a genetic algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (118)), 30–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263387>
- Khudov, H., Makoveichuk, O., Khizhnyak, I., Shamrai, B., Glukhov, S., Lunov, O. et al. (2022). The Method for Determining Informative Zones on Images from On-Board Surveillance Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12 (8), 61–69. https://doi.org/10.46338/ijetae0822_08
- Kanakaraj, S., Nair, M. S., Kalady, S. (2019). Adaptive Importance Sampling Unscented Kalman Filter based SAR image super resolution. *Computers & Geosciences*, 133, 104310. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104310>
- Rubel, O. S., Rubel, A. S., Lukin, V., Egiazarian, K. (2022). Optimal parameters selection of the Frost filter based on despeckling efficiency prediction for Sentinel SAR images. *Electronic Imaging*, 34 (10), 193–193–196. <https://doi.org/10.2352/ei.2022.34.10.ipas-193>
- Ruban, I., Khudov, H., Khudov, V., Makoveichuk, O., Khizhnyak, I., Shamrai, N. et al. (2025). Development of an image segmentation method from unmanned aerial vehicles based on the ant colony algorithm under the influence of speckle noise. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (2 (84)), 80–86. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334993>
- Benes, R., Riha, K. (2012). Medical Image Denoising by Improved Kuan Filter. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 10 (1), 43–49. <https://doi.org/10.15598/aee.v10i1.529>
- Tripathi, A., Bhateja, V., Sharma, A.; Mandal, J., Satapathy, S., Sanyal, M., Bhateja, V. (Eds.) (2016). Kuan Modified Anisotropic Diffusion Approach for Speckle Filtering. Proceedings of the First International Conference on Intelligent Computing and Communication. Singapore: Springer, 537–545. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2035-3_55
- Sentinel-1. European Space Agency. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-1>
- Sun, Z., Zhang, Z., Chen, Y., Liu, S., Song, Y. (2020). Frost Filtering Algorithm of SAR Images With Adaptive Windowing and Adaptive Tuning Factor. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17 (6), 1097–1101. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2019.2939208>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352892

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF THE MULTICLASS PAP SMEAR IMAGE SEGMENTATION BASED ON CROSS-DOMAIN TRANSFER LEARNING WITH LIMITED DATA (p. 47–55)

Margulan Nurtay

Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0786-6195>

Gaukhar Alina

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7697-4667>

Ardak Tau

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4883-6328>

This study examined automated multi-class semantic segmentation of Pap smear images used for cervical cancer detection. The effectiveness of existing deep learning methods is often limited due to a lack of labeled data, high morphological variability of cervical cells, overlapping structures, noise, low contrast, and imaging artifacts characteristic of cytology specimens.

In this study, the authors propose a cross-domain transfer learning approach that adapts pre-trained deep neural networks to the task of multi-class Pap smear segmentation. All networks were pre-trained on large-scale natural image datasets. In the experiments, both convolutional neural networks and Transformer-based models, including hybrid configurations, were refined and systematically compared. Network performance was assessed using quantitative metrics (Dice score, IoU, HD95), as well as qualitative visual assessment of segmentation edges and boundaries.

The results obtained from the experiments showed that Transformer-based architectures, in particular SegFormer, significantly outperform convolutional models when processing noisy and heterogeneous cytological data. Using specialized data augmentation strategies developed specifically for medical imaging, SegFormer increased Dice scores to 0.95 across all classes (healthy, unhealthy, rubbish, both cells), as well as improved edge accuracy and robustness to artifacts and cell aliasing.

Multi-scale feature extraction and global context modeling proved essential for accurately identifying cellular structures in data-constrained settings. The results obtained in the study can help in the development of reliable automated diagnostic tools to assist cytopathologists, as well as to improve the overall accuracy and efficiency of cervical cancer screening programs.

Keywords: transfer learning, Pap smear, cervical cancer, segmentation, deep learning.

References

- Mustafa, W. A., Ismail, S., Mokhtar, F. S., Alquran, H., Al-Issa, Y. (2023). Cervical Cancer Detection Techniques: A Chronological Review. *Diagnostics*, 13 (10), 1763. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13101763>
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M. et al. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60–88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
- Fang, M., Liao, B., Lei, X., Wu, F.-X. (2024). A systematic review on deep learning based methods for cervical cell image analysis. *Neurocomputing*, 610, 128630. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128630>
- Cruz-Roa, A., Basavanthally, A., González, F., Gilmore, H., Feldman, M., Ganesan, S. et al. (2014). Automatic detection of invasive ductal carcinoma in whole slide images with convolutional neural networks. *Medical Imaging 2014: Digital Pathology*, 9041, 904103. <https://doi.org/10.1117/12.2043872>
- Pati, P., Jaume, G., Foncubierta-Rodríguez, A., Feroce, F., Annicelli, A. M., Scognamiglio, G. et al. (2022). Hierarchical graph representations in digital pathology. *Medical Image Analysis*, 75, 102264. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102264>
- Win, K. Y., Choomchuay, S. (2017). Automated segmentation of cell nuclei in cytology pleural fluid images using OTSU thresholding. 2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), 14–18. <https://doi.org/10.1109/icdamt.2017.7904925>
- Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Oktay, O., Schlemper, J., Folgoc, L. L., Lee, M., Heinrich, M., Mi-sawa, K. et al. (2018). Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.03999>
- Hatamizadeh, A., Tang, Y., Nath, V., Yang, D., Myronenko, A., Landman, B. et al. (2022). UNETR: Transformers for 3D Medical Image Segmentation. 2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 1748–1758. <https://doi.org/10.1109/wacv51458.2022.00181>
- Chen, J., Lu, Y., Yu, Q., Luo, X., Adeli, E., Wang, Y. et al. (2021). TransUNet: Transformers Make Strong Encoders for Medical Image Segmentation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.04306>
- Wang, W., Xie, E., Li, X., Fan, D.-P., Song, K., Liang, D. et al. (2021). Pyramid Vision Transformer: A Versatile Backbone for Dense Prediction without Convolutions. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 548–558. <https://doi.org/10.1109/iccv48922.2021.00061>
- Xu, C., Li, M., Li, G., Zhang, Y., Sun, C., Bai, N. (2022). Cervical Cell/Clumps Detection in Cytology Images Using Transfer Learning. *Diagnostics*, 12 (10), 2477. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12102477>
- Raghu, M., Zhang, C., Kleinberg, J., Bengio, S. (2019). Transfusion: Understanding Transfer Learning for Medical Imaging. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.07208>
- Tajbakhsh, N., Shin, J. Y., Gurudu, S. R., Hurst, R. T., Kendall, C. B., Gotway, M. B., Liang, J. (2016). Convolutional Neural Networks for Medical Image Analysis: Full Training or Fine Tuning? *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35 (5), 1299–1312. <https://doi.org/10.1109/tmi.2016.2535302>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770–778. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S. et al. (2015). ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115 (3), 211–252. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T. et al. (2020). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
- Chen, L.-C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H. (2018). Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. *Computer Vision – ECCV 2018*, 833–851. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49
- Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., Luo, P. (2021). SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.15203>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352116

OPTIMIZATION OF CHANNEL PACKET LOSS IN WIRELESS SENSOR COMMUNICATION SYSTEMS USING MODEL PREDICTIVE CONTROL (p. 56–67)

Ainur Ormanbekova

Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8663-006X>

Anar Khabay

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>

Yerkebulan Tuleshov

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>

Nurlan Sarsenbayev

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8640-7175>

Zhazira Julayeva

Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9246-3851>

Serikbek Ibekeyev

Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1991-8642>

Maral Abulkhanova

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6055-1646>

Askhat Tlegenov

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0967-1443>

Magzhan Igen

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7156-5182>

The object of the study is an IEEE 802.15.4 (2.4 GHz) wireless networked control system (WNCS) closing the loop over a wireless sensor network. Fading and interference increase packet loss and delay, reducing stability margins and control quality. The unresolved problem is the lack of a unified end-to-end (E2E) loss model that links PHY signal quality, multi-hop routing and medium access to closed-loop behavior and can be embedded into controller synthesis. An SINR-based channel model (path loss, lognormal shadowing, multipath fading) is mapped to BER and packet error probability; E2E loss for single-hop and multi-hop routes is obtained using Bernoulli and finite-state Markov (FSMC) processes. For verification, original packet traces are captured with an IEEE 802.15.4 sniffer/logger and stored before processing (timestamp, node identifier, sequence number, RSSI/LQI and delivery outcome) to compute PER, latency and burstiness and to parameterize the SINR-to-PER mapping and loss models. Simulations show that TDMA/TSCH achieves up to 40% lower loss than CSMA/CA, while E2E loss rises from 3% to 32% as hop count increases from 1 to 8. An MPC-based co-design jointly adapts transmit power, sampling period and retransmissions. Compared with a fixed-parameter LQR baseline, E2E PER is reduced from 4.45% to 3.66%, average delay from 0.20 s to 0.12 s, and integral absolute error by 50%. The gains are attributed to reduced contention under TDMA scheduling and predictor-driven MPC adaptation. The approach targets industrial monitoring and control with fixed sampling, slowly varying interference and static multi-hop topologies, where parameters can be identified offline and used for online MPC adaptation.

Keywords: wireless sensor network, WNCS, packet loss, SINR, Bernoulli process, finite-state Markov chain, TDMA, CSMA/CA, MPC.

References

1. Pezzutto, M., Dey, S., Garone, E., Gatsis, K., Johansson, K. H., Schenato, L. (2024). Wireless control: Retrospective and open vistas. *Annual Reviews in Control*, 58, 100972. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100972>
2. Hamdan, M. M., Mahmoud, M. M. (2022). Analysis and Challenges in Wireless Networked Control System: A Survey. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2 (3), 492–522. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.731>
3. Huang, K., Liu, W., Li, Y., Savkin, A., Vucetic, B. (2020). Wireless Feedback Control With Variable Packet Length for Industrial IoT. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9 (9), 1586–1590. <https://doi.org/10.1109/lwc.2020.2998611>
4. Liu, Y., Wang, J., Gomes, L., Sun, W. (2021). Adaptive Robust Control for Networked Strict-Feedback Nonlinear Systems with State and Input Quantization. *Electronics*, 10 (22), 2783. <https://doi.org/10.3390/electronics10222783>
5. Shi, T., Guan, Y., Zheng, Y. (2022). Model predictive control of networked control systems with disturbances and deception attacks under communication constraints. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 35 (7), 2717–2735. <https://doi.org/10.1002/rnc.6363>
6. Kumatova, M., Tuleshov, A., Baurzhan, A., Jomartov, A., Tuleshov, Y., Sayakov, O. (2025). Development and Validation of An Automated Crank Press System Integrating the Stephenson II Six-Bar Linkage and Model Predictive Control. *ES Materials & Manufacturing*. <https://doi.org/10.30919/mm1799>
7. Lee, M.-F. R., Chiu, F.-H. S., Huang, H.-C., Ivancsits, C. (2013). Generalized Predictive Control in a Wireless Networked Control System. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9 (12), 475730. <https://doi.org/10.1155/2013/475730>
8. Florenzan Reyes, L. F., Smarra, F., Lun, Y. Z., D’Innocenzo, A. (2021). Learning Markov models of fading channels in wireless control networks: a regression trees based approach. 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 232–237. <https://doi.org/10.1109/med51440.2021.9480310>
9. Kim, M.-J., Lee, H.-I., Choi, J.-H., Lim, K. J., Mo, C. (2022). Development of a Soil Organic Matter Content Prediction Model Based on Supervised Learning Using Vis-NIR/SWIR Spectroscopy. *Sensors*, 22 (14), 5129. <https://doi.org/10.3390/s22145129>
10. Silva, C. A. G. da, Santos, E. L. dos (2023). A Compensation Model for Packet Loss Using Kalman Filter in Wireless Network Control Systems. *Energies*, 16 (8), 3329. <https://doi.org/10.3390/en16083329>
11. Yue, X., Liu, Y. (2022). Performance Analysis of Intelligent Reflecting Surface Assisted NOMA Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21 (4), 2623–2636. <https://doi.org/10.1109/twc.2021.3114221>
12. Jia, Y., Ye, C., Cui, Y. (2020). Analysis and Optimization of an Intelligent Reflecting Surface-Assisted System With Interference. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 (12), 8068–8082. <https://doi.org/10.1109/twc.2020.3019088>
13. Orea-Flores, I. Y., Rivero-Angeles, M. E., Gonzalez-Ambriz, S.-J., Anaya, E. A., Saleem, S. (2024). Performance Analysis of Wireless Sensor Networks Using Damped Oscillation Functions for the Packet Transmission Probability. *Computers*, 13 (11), 285. <https://doi.org/10.3390/computers13110285>
14. Zila, A., Ouchatti, A., Mouzouna, Y. (2025). Exploring Node Failure and Packet Loss in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Simulation Analysis. *International Journal of Communication Systems*, 38 (13). <https://doi.org/10.1002/dac.70174>
15. Lun, Y. Z., Rinaldi, C., D’Innocenzo, A., Santucci, F. (2024). Co-Designing Wireless Networked Control Systems on IEEE 802.15.4-Based Links Under Wi-Fi Interference. *IEEE Access*, 12, 71157–71183. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3402082>
16. Vayssade, T., Azais, F., Latorre, L., Lefevre, F. (2019). Low-Cost Digital Test Solution for Symbol Error Detection of RF ZigBee Transmitters. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 19 (1), 16–24. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2019.2898769>
17. Díez, V., Arriola, A., Val, I., Velez, M. (2020). Reliability evaluation of point-to-point links based on IEEE 802.15.4 physical layer for IWSAN applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 113, 152967. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152967>
18. Barac, F., Gidlund, M., Zhang, T. (2014). Scrutinizing Bit- and Symbol-Errors of IEEE 802.15.4 Communication in Industrial Environments.

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63 (7), 1783–1794. <https://doi.org/10.1109/tim.2013.2293235>
19. Chen, D., Zhuang, Y., Huai, J., Sun, X., Yang, X., Awais Javed, M. et al. (2021). Coexistence and Interference Mitigation for WPANs and WLANs From Traditional Approaches to Deep Learning: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 21 (22), 25561–25589. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3117399>
 20. Yang, D., Xu, Y., Gidlund, M. (2011). Wireless Coexistence between IEEE 802.11- and IEEE 802.15.4-Based Networks: A Survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 7 (1), 912152. <https://doi.org/10.1155/2011/912152>
 21. Yu, Y.-S., Chen, Y.-S. (2020). A Measurement-Based Frame-Level Error Model for Evaluation of Industrial Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 20 (14), 3978. <https://doi.org/10.3390/s20143978>
 22. Brown, J., Roedig, U., Boano, C. A., Romer, K. (2014). Estimating packet reception rate in noisy environments. 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops, 583–591. <https://doi.org/10.1109/lcnw.2014.6927706>
 23. Satoh, D., Kobayashi, K., Yamashita, Y. (2018). MPC-based Co-design of Control and Routing for Wireless Sensor and Actuator Networks. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16 (3), 953–960. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0170-7>
 24. Kidane, Z. M., Dargie, W. (2025). Impact of Cross Technology Interference on Time Synchronization and Join Time in Low-Power Wireless Networks. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5119414>
 25. Balbi, M., Doherty, L., Watteyne, T. (2025). A comprehensive survey on channel hopping and scheduling enhancements for TSCH networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 238, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104164>
 26. Kidane, Z. M., Dargie, W. (2025). Cross-technology interference: detection, avoidance, and coexistence mechanisms in the ISM bands. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 7 (3), 356–375. <https://doi.org/10.1007/s42486-025-00185-0>
 27. Wen, H., Lin, C., Chen, Z.-J., Yin, H., He, T., Dutkiewicz, E. (2009). An Improved Markov Model for IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA Mechanism. *Journal of Computer Science and Technology*, 24 (3), 495–504. <https://doi.org/10.1007/s11390-009-9240-5>
 28. Kim, S., Kim, B.-S., Kim, K. H., Kim, K.-I. (2019). Opportunistic Multipath Routing in Long-Hop Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 19 (19), 4072. <https://doi.org/10.3390/s19194072>
 29. Marelli, D. E., Sui, T., Rohr, E. R., Fu, M. (2019). Stability of Kalman filtering with a random measurement equation: Application to sensor scheduling with intermittent observations. *Automatica*, 99, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.11.003>
 30. Li, P., Zhao, Y.-B., Kang, Y. (2022). Integrated Channel-Aware Scheduling and Packet-Based Predictive Control for Wireless Cloud Control Systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52 (5), 2735–2749. <https://doi.org/10.1109/tycb.2020.3019179>
 31. Liu, W., Quevedo, D. E., Li, Y., Johansson, K. H., Vucetic, B. (2022). Remote State Estimation With Smart Sensors Over Markov Fading Channels. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67 (6), 2743–2757. <https://doi.org/10.1109/tac.2021.3090741>
 32. Girgis, A. M., Park, J., Bennis, M., Debbah, M. (2021). Predictive Control and Communication Co-Design via Two-Way Gaussian Process Regression and AoI-Aware Scheduling. *IEEE Transactions on Communications*, 69 (10), 7077–7093. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2021.3099156>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351773

DESIGN OF AUTONOMOUS GAZE-TRACKING SYSTEM FOR INCLUSIVE EDUCATION (p. 68–77)

Andrii Symkin

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2439-3560>

Oleksandr Mitsa

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
Ferenc Rákóczi II Transcarpathian Hungarian University, Berehove,
Transcarpathia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6958-0870>

Yurii Horoshko

T. H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»,
Chernihiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9290-7563>

Hanna Tsybko

T. H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»,
Chernihiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1861-3003>

Viktor Shakotko

Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University,
Hlukhiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3004-5045>

Eye-tracking technology as a means of ensuring the accessibility of education for people with severe musculoskeletal disorders has been investigated in this study. A number of assistive technologies have been devised up to now that possess significant educational potential, but their autonomous use is mainly associated with such difficulties as dependence on the instability of wireless networks or external computing resources. The need to overcome the technological gap between the capabilities of assistive technologies and their real autonomy is a task addressed in this work.

The study's result is the designed fully autonomous architecture based on virtual reality headsets (Meta Quest), which enables the execution of all eye image processing activities and provides direct interface control using the device's processor. The hardware was improved (frame miniaturization, transition to a wired USB interface were carried out); software was developed in the Rust language in the OpenXR API (Application Programming Interface) layer format.

That has made it possible to get rid of network delays and ensure the system's operation, resistant to any conditions. Direct interaction with the headset hardware is provided by effective optimization of convolutional neural networks and the use of low-level system calls. An immersive graphical user interface (GUI) was designed, successfully tested for system configuration and calibration. The GUI became available directly in the virtual space of the headset.

The results could be used for individual learning at home, as well as at inclusive educational institutions or rehabilitation centers that organize training for people with severe musculoskeletal disorders.

Keywords: eye-tracking, inclusive education, motor disorders, VR headset, accessibility of education, adaptive technologies.

References

1. Nyström, M., Holmqvist, K. (2010). An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data. *Behavior Research Methods*, 42 (1), 188–204. <https://doi.org/10.3758/brm.42.1.188>
2. Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., van de Weijer, J. (2011). *Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures*. Oxford, 560.
3. Kapp, S., Barz, M., Mukhametov, S., Sonntag, D., Kuhn, J. (2021). ARETT: Augmented Reality Eye Tracking Toolkit for Head Mounted Displays. *Sensors*, 21 (6), 2234. <https://doi.org/10.3390/s21062234>
4. Holmqvist, K., Örbom, S. L., Hooge, I. T. C., Niehorster, D. C., Alexander, R. G., Andersson, R. et al. (2022). RETRACTED ARTICLE: Eye tracking: empirical foundations for a minimal reporting guideline. *Behavior Research Methods*, 55 (1), 364–416. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01762-8>
5. Šmidekova, Z., Minarikova, E., Janik, M., Holmqvist, K. (2019). Using eye-tracking to investigate differences in teachers' profes-

- sional vision IN action and ON action. *Journal of Eye Movement Research*, 12 (7), 260. Available at: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A7%3A10210567/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A142777840&crl=c&link_origin=scholar.google.com
6. Sim, G., Bond, R. (2021). Eye tracking in Child Computer Interaction: Challenges and opportunities. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 30, 100345. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2021.100345>
 7. El Moucary, C., Kassem, A., Rizk, D., Rizk, R., Sawan, S., Zakhem, W. (2024). A low-cost full-scale auto eye-tracking system for mobility-impaired patients. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 174, 155023. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.155023>
 8. Sugianto, M., Zhou, Y., Qiu, J. (2025). Eye tracking-based dual task in rehabilitation of motor and cognitive function in post-stroke patients: a literature review. *Bulletin of Faculty of Physical Therapy*, 30 (1). <https://doi.org/10.1186/s43161-025-00295-x>
 9. Sunny, M. S. H., Zarif, M. I. I., Rulik, I., Sanjuan, J., Rahman, M. H., Ahamed, S. I. et al. (2021). Eye-gaze control of a wheelchair mounted 6DOF assistive robot for activities of daily living. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18 (1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00969-2>
 10. Bogachkov, Y., Uhan, P. (2025). Models of blended learning in the context of mixed processes. *Information Technologies and Learning Tools*, 107 (3), 239–260. <https://doi.org/10.33407/itl.v107i3.5920>
 11. Batsenko, S., Bohachkov, Yu., Burov, O., Horbachenko, V., Korkishko, I., Lytvynova, S., Nosenko, Yu. et al. (2025). *Imersywni tehnolohiyi dlia pidtrymky zmishanoho navchannia v zakladakh zahalnoi serednoi osvity*. Kyiv: ITS NAPN Ukrainy, 174. Available at: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/746953/1/ПОСІБНИК.pdf>
 12. Sedinkin, O., Derkach, M., Skarga-Bandurova, I., Matiuk, D. (2024). *Sistema dlia vidstezhennia rukhu ochei na osnovi mashynnoho navchannia*. Computer-integrated technologies: education, science, production, 55, 199–205. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-25>
 13. Barkovska, O., Liapin, Y., Muzyka, T., Ryndyk, I., Botnar, P. (2024). Gaze direction monitoring model in computer system for academic performance assessment. *Information Technologies and Learning Tools*, 99 (1), 63–75. <https://doi.org/10.33407/itl.v99i1.5503>
 14. *Introducing Bigscreen Beyond 2 with next-gen optics and eyetracking*. Available at: <https://store.bigscreenvr.com/blogs/beyond/introducing-bigscreen-beyond-2>
 15. *My interview with Play For Dream about their headset, Android XR, enterprise licensing, China, and more!* Available at: <https://skarredg-host.com/2025/06/05/play-for-dream-interview-android-xr/>
 16. *Vive Focus Vision Announced*. Available at: <https://www.uploadvr.com/vive-focus-vision-announced/>
 17. *Introducing Galaxy XR: Opening New Worlds*. Available at: <https://news.samsung.com/us/introducing-galaxy-xr-opening-new-worlds/>
 18. *Valve Officially Announces Steam Frame, A “Streaming-First” Stand-alone VR Headset*. Available at: <https://www.uploadvr.com/valve-steam-frame-official-announcement-features-details/>
 19. *Project-Babble/Baballonia*. Available at: <https://github.com/Project-Babble/Baballonia>
 20. Geche, F., Mitsa, O., Mulesa, O., Horvat, P. (2022). Synthesis of a Two Cascade Neural Network for Time Series Forecasting. 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/saic57818.2022.9922991>
 21. Lupei, M., Shlahta, M., Mitsa, O., Horoshko, Y., Tsybko, H., Gorbachuk, V. (2022). Development of an Interactive Map Within the Implementation of Actual State and Public Directions. 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). <https://doi.org/10.1109/acit54803.2022.9913191>
 22. Mitsa, O., Sharkan, V., Maksymchuk, V., Varha, S., Shkurko, H. (2023). Ethnocultural, Educational and Scientific Potential of the Interactive

Dialects Map. 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 226–231. <https://doi.org/10.1109/sist58284.2023.10223544>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.350949

IMPROVING SPEECH-TO-TEXT FOR THE INDONESIAN LANGUAGE USING A MODIFIED TRANSFORMER (p. 78–90)

Ratna Atika

Universitas Sriwijaya, Ogan Ilir, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5459-0798>

Suci Dwijayanti

Universitas Sriwijaya, Ogan Ilir, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2060-6408>

Bhakti Yudho Suprpto

Universitas Sriwijaya, Ogan Ilir, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3995-6347>

The object of this study is a transformer-based ASR architecture trained using an Indonesian speech dataset consisting of audio recordings and corresponding transcripts. This study examines the development of an Automatic Speech Recognition (ASR) system for Indonesian, which is still classified as a low-resource language, particularly in terms of dataset availability and model performance. The problem addressed in this study is the limited performance of the standard transformer model in accurately recognizing Indonesian speech. To overcome this limitation, an encoder modification integrating convolutional and vision transformer (ViT) blocks was proposed and compared with the baseline model. The data were pre-processed through 16 kHz mono audio conversion, silence segmentation, pre-emphasis filtering, log-Mel spectrogram extraction, normalization, and subword tokenization using SentencePiece with byte pair encoding (BPE). The dataset was divided into training, validation, and testing sets with a ratio of 80:10:10, comprising 63,952, 7,994, and 7,994 samples, respectively. Model generalization was improved using the SpecAugment data augmentation technique. The experimental results show that the standard model achieves a word error rate (WER) of 0.162 and a character error rate (CER) of 0.121, while the modified model reduces the WER to 0.158 and the CER to 0.118. The significance of this finding lies in the improved feature representation produced by the modified encoder, where the convolutional block captures local acoustic patterns and the ViT block enhances global context modeling on the spectrogram. This complementary mechanism explains the reduction in errors at the word level, which is crucial for a reliable speech-to-text system. Therefore, the proposed model can be applied to real-time two-way communication in service robot applications.

Keywords: ASR, modified transformer, SentencePiece, Indonesian dataset, deep learning.

References

1. Loubser, A., De Villiers, P., De Freitas, A. (2024). End-to-end automated speech recognition using a character based small scale transformer architecture. *Expert Systems with Applications*, 252, 124119. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124119>
2. Ro, J. H., Stahlberg, F., Wu, K., Kumar, S. (2022). Transformer-based Models of Text Normalization for Speech Applications. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.00153>
3. Alastruey, B., Gállego, G. I., Costa-jussà, M. R. (2021). Efficient Transformer for Direct Speech Translation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03069>
4. KHu, K., Pang, R., Sainath, T. N., Strohmaier, T. (2021). Transformer Based Deliberation for Two-Pass Speech Recognition. 2021 IEEE

- Spoken Language Technology Workshop (SLT), 68–74. <https://doi.org/10.1109/slt48900.2021.9383497>
5. Le, P.-H., Gong, H., Wang, C., Pino, J., Lecouteux, B., Schwab, D. (2023). Pre-training for Speech Translation: CTC Meets Optimal Transport. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.11716>
 6. Ahmadian, H., Abidin, T. F., Riza, H., Muchtar, K. (2023). Transformer-Based Indonesian Language Model for Emotion Classification and Sentiment Analysis. 2023 International Conference on Information Technology and Computing (ICITCOM), 209–214. <https://doi.org/10.1109/icitcom60176.2023.10442970>
 7. Heryadi, Y., Wijanarko, B. D., Fitria Murad, D., Tho, C., Hashimoto, K. (2022). The Effect of Encoder and Decoder Stack Depth of Transformer Model to Performance of Machine Translator for Low-resource Languages. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2766–2776. <https://doi.org/10.46254/ap03.20220479>
 8. Heryadi, Y., Wijanarko, B. D., Fitria Murad, D., Tho, C., Hashimoto, K. (2023). Revalidating the Encoder-Decoder Depths and Activation Function to Find Optimum Vanilla Transformer Model. 2023 International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering (ICCoSITE), 162–167. <https://doi.org/10.1109/iccosite57641.2023.10127790>
 9. Sonata, I., Heryadi, Y., Tho, C. (2023). Topic Segmentation using Transformer Model for Indonesian Text. Procedia Computer Science, 227, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.513>
 10. Suyanto, S., Arifianto, A., Sirwan, A., Rizaendra, A. P. (2020). End-to-End Speech Recognition Models for a Low-Resourced Indonesian Language. 2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/icoict49345.2020.9166346>
 11. Sonata, I. (2023). Automatic Speech Recognition in Indonesian Using the Transformer Model. 2023 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Informations System (ICIMCIS), 263–266. <https://doi.org/10.1109/icimcis60089.2023.10349042>
 12. Wijanarko, B. D., Fitria Murad, D., Heryadi, Y., Tho, C., Hashimoto, K. (2023). Exploring the Effect of Activation Function on Transformer Model Performance for Official Announcement Translator from Indonesian to Sundanese Languages. 2023 International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering (ICCoSITE), 827–831. <https://doi.org/10.1109/iccosite57641.2023.10127770>
 13. Wongso, W., Setiawan, D. S., Suhartono, D. (2021). Causal and Masked Language Modeling of Javanese Language using Transformer-based Architectures. 2021 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), 1–7. <https://doi.org/10.1109/icacsis53237.2021.9631331>
 14. Fuadi, M., Wibawa, A. D., Sumpeno, S. (2023). idT5: Indonesian Version of Multilingual T5 Transformer. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.00856>
 15. Musyafa, A., Gao, Y., Solyman, A., Wu, C., Khan, S. (2022). Automatic Correction of Indonesian Grammatical Errors Based on Transformer. Applied Sciences, 12 (20), 10380. <https://doi.org/10.3390/app122010380>
 16. Fudholi, D. H., Nayoan, R. A. N. (2022). The Role of Transformer-based Image Captioning for Indoor Environment Visual Understanding. International Journal of Computing and Digital Systems, 12 (3), 479–488. <https://doi.org/10.12785/ijcds/120138>
 17. Aditya Rachman, A., Suyanto, S., Rachmawati, E. (2021). Leveraging CNN and Bi-LSTM in Indonesian G2P Using Transformer. 2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing, 161–165. <https://doi.org/10.1145/3457682.3457706>
 18. Sirwan, A., Thama, K. A., Suyanto, S. (2022). Indonesian Automatic Speech Recognition Based on End-to-end Deep Learning Model. 2022 IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom), 410–415. <https://doi.org/10.1109/cyberneticscom55287.2022.9865253>
 19. Wardo, Muljono, Purwanto, Noersasongko, E. (2023). Improving Named Entity Recognition in Bahasa Indonesia with Transformer-Word2Vec-CNN-Attention Model. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 16 (4), 655–668. <https://doi.org/10.22266/ijies2023.0831.53>
 20. Hutama, L. B., Suhartono, D. (2022). Indonesian Hoax News Classification with Multilingual Transformer Model and BERTopic. Informatica, 46 (8). <https://doi.org/10.31449/inf.v46i8.4336>
 21. Lin, T., Wang, Y., Liu, X., Qiu, X. (2022). A survey of transformers. AI Open, 3, 111–132. <https://doi.org/10.1016/j.aiopen.2022.10.001>
 22. Xu, P., Zhu, X., Clifton, D. A. (2023). Multimodal Learning With Transformers: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 45 (10), 12113–12132. <https://doi.org/10.1109/tpami.2023.3275156>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351685

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ТРАНЗАКЦІЙ У МЕРЕЖІ BITCOIN ЗА ДОПОМОГОЮ МЕХАНІЗМУ УВАГИ В ГРАФОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖАХ (с. 6–18)

О. С. Купшнерьов, В. В. Просолов, В. Б. Дудикевич, С. П. Євсєєв, С. І. Поваляєв, Є. В. Іванченко, В. І. Горбулик, О. В. Чечуй, Д. С. Балагура, В. М. Сухотеplий

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованої класифікації транзакцій та ідентифікації адрес Bitcoin для виявлення зловмисної активності в умовах псевдоанонімності. Проблемою є недостатня ефективність алгоритмів, таких як графові згорткові мережі, в умовах сильного дисбалансу класів. Таке відкриття є особливо важливим, коли менше десяти відсотків даних мають чітке маркування. Однак основною складністю є надмірне згладжування ознак, що ускладнює ефективне виявлення аномалій для щільних графіків. З отриманих результатів підтверджується, що модель на базі графової мережі уваги версії 2 (Graph Attention Network v2, GATv2) ефективна. Вона досягає точності 91,19% та значення F1-показник 91,11% при тестуванні. Крім того, стабільність підходу підтверджується, коли до структури графа додається 15% топологічних шумів. Щоб довести селективність класифікатора, значення площі під кривою (Area Under the Curve, AUC) підходу становить 0,889. Результати пояснюються впровадженням механізму динамічної анізотропної агрегації, який адаптивно розподіляє ваги уваги. Це дозволяє вибірково підсилювати слабкі сигнали підозрілих транзакцій, ігноруючи нерелевантні зв'язки та шум. Особливістю є модель уніфікації ознак через логарифмічну нормалізацію сум та нелінійну обробку часових інтервалів. Унікальність полягає у використанні зважених функцій втрат та стратегій активного навчання на граничних зразках. Застосовано дворівневе трансферне навчання на датасетах Elliptic та BitcoinHeist. Сферою використання є інтеграція в системи протидії відмиванню грошей (Anti-Money Laundering, AML) реального часу. Підхід дозволяє долати концептуальний зсув при появі нових типів кіберзагроз. Метод детектує активність вимагачів типу CryptoLocker за дефіциту даних.

Ключові слова: блокчейн, BitcoinHeist, GATv2, графові нейронні мережі, трансферне навчання, активне навчання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351181

РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОГО СТЕГАНОГРАФІЧНОГО ВБУДОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СТРУКТУРНО-ПСИХОВІЗУАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ (с. 19–30)

В. В. Бараннік, Д. В. Бараннік, Р. О. Прокопенко, В. М. Бабенко, О. О. Акімов, Н. М. Петруха

Об'єктом дослідження є процеси підвищення ефективності стеганографічних методів для захисту інформації з заданим рівнем цілісності та оперативності передачі в інфокомунікаційних системах. В роботі досліджується науково-прикладна проблема стосовно підвищення рівня захисту інформації з заданим рівнем цілісності оперативності її доставки з безпілотних комплексів (БПК). Це зумовлено наявністю протиріччя між забезпеченням конфіденційності відеоінформації та оперативністю її доставки з заданою цілісністю. В процесі дослідження розробляється метод структурного стеганографічного вбудовування на основі зміни значень основи позиційного базису (ПБ). Відмінністю є вбудовування інформації в процесі модифікації величин ПБ з врахуванням виявлення структурних залежностей в спектрально-модифікованому просторі відео-контейнеру (ВКН). Такі перетворення здійснюються за умов зменшення впливу модифікацій спектрального простору на рівень стиснення. Наведені переваги дозволяють побудувати комплексний метод стеганографічних перетворень в процесі стиснення ВКН. До основних відмінностей методу слід віднести два аспекти. Перша – це використання послідовності стеганографічних перетворень в незалежних просторах щодо виявлення залежностей, які використовуються в процесі вбудовування інформації. Друга – це те, що вбудовування інформації здійснюється в структурно-спектральному просторі з врахуванням його модифікації за наймолодшими бітами. Це дозволяє збільшити рівень стеганографічної ємності в середньому на 7 % без внесення спотворень цілісності стегано-контейнерів та вилученої на приймальній стороні прихованої інформації. Розроблений метод передбачається використовувати для підвищення конфіденційності, оперативності та цілісності доставки відеоінформації з безпілотних комплексів.

Ключові слова: безпілотні комплекси, інфокомунікаційні системи, відео-контейнер, надмірність, структурні залежності, позиційний базис.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.348890

РОЗРОБКА ГІБРИДНОГО ЙМОВІРНІСНОГО МЕТОДУ ГЕНЕРАЦІЇ КЛЮЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОШАРОВОГО ШИФРУ РІВЕСТА-ШАМІРА-АДЛЕМАНА ТА НАВЧАННЯ З ПОМИЛКАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ШИФРУ ГІЛЛА (с. 31–39)

Mahdianta Pandia, Poltak Sihombing, Mohammad Andri Budiman, Erna Budhiarti Nababan

Це дослідження зосереджено на вразливостях класичного матричного шифрування та асиметричних схем доповнення в гібридних криптосистемах для захисту високопродуктивних потоків корпоративних даних. Алгоритм шифру Гілла є дуже вразливим до атак з відомим відкритим текстом та аналізу розподілу частот, тоді як стандартна схема доповнення Рівеста-Шаміра-Адлемана (RSA) стандартів криптографії з відкритим ключем (PKCS#1 v1.5) є вразливою до атак оракула з доповненням. Щоб подолати

ці проблеми, це дослідження пропонує гібридну криптографічну модель, яка інтегрується зі схемою ймовірнісної схеми матриці ключів (KMPS) з використанням багатoshарової архітектури RSA та навчання з помилками (LWE), поряд з модифікованою схемою доповнення (PKCS #1 v1.5e) з використанням випадкових шумів. Особливістю цього методу є побудова недетермінованої матриці ключів, що поєднує випадкову базову матрицю з діагональною матрицею, отриманою з багатoshарових параметрів RSA, та вставляє гауссівський ймовірнісний шум. Після цього проводиться перевірка безпеки за допомогою набору статистичних тестів Національного інституту стандартів і технологій (NIST). Експериментальні результати показують, що для матриці 10 x 10 шифротекст досягає P-значення 0,788 у тесті частотного монобіту, що значно перевищує поріг NIST 0,01. Це означає, що вихідний результат статистично не відрізняється від випадкового шуму. Спостерігається ефект лавини 50,13%, що демонструє сильну відповідність критерію лавини та вказує на значну стійкість до диференціальних криптоаналітичних атак. Внутрішня ентропія ключа збільшена до 6,28 біта. Ця модель забезпечує надійне рішення для захисту конфіденційних записів бази даних та журналів транзакцій у корпоративних середовищах, а також гарантує конфіденційність без шкоди для обчислювальної ефективності.

Ключові слова: шифр Гілла, багаточисловий RSA, навчання з помилками, ймовірнісне шифрування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352347

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ З КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ КУАНА (с. 40–46)

Г. В. Худов, О. М. Маковейчук, С. А. Токарев, А. О. Андриющенко, О. В. Пуховий, О. В. Рогуля, О. В. Білоус, М. В. Веровок, В. М. Самоїленко, В. Г. Худов

Об'єктом дослідження є процес фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження. Вирішена проблема фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження шляхом застосування алгоритму Куана.

Отримані наступні основні результати:

- основні етапи методу фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження на основі алгоритму Куана;
- проведено експериментальне дослідження щодо фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження на основі алгоритму Куана.

Удосконалено метод фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження на основі алгоритму Куана.

Особливостями удосконаленого методу, на відміну від відомих, є:

- вибір локального вікна фільтрації;
- обчислення локальних статистичних характеристик;
- обчислення коефіцієнтів варіації;
- обчислення вагового коефіцієнту Куана;
- послідовну фільтрацію пікселів зображення методом «ковзаючого» вікна.

Проведено візуальний аналіз фільтрації радіолокаційного зображення удосконаленим методом на основі алгоритму Куана та відомих методами на основі алгоритму Лі та алгоритму Фроста. Використання удосконаленого методу при фільтрації зображення з космічної системи радіолокаційного спостереження дозволило підвищити величину відношення сигнал/шум. Це стало можливим завдяки використанню алгоритму Куана. Вибір алгоритму Куана дозволив забезпечити вииграш у максимальному відношенні сигнал/шум у порівнянні з відомим методом на 21% (метод на основі алгоритму Лі).

Сфера застосування удосконаленого методу – фільтрація зображень з космічних систем радіолокаційного спостереження. Умови практичного використання отриманих результатів: спеціалізоване програмне забезпечення програмно-технічних комплексів обробки радіолокаційних зображень.

Ключові слова: космічна система радіолокаційного спостереження, фільтрація зображення, алгоритм Куана, відношення сигнал/шум.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352892

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ БАГАТОКЛАСОВОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ МАЗКІВ ПАПА НА ОСНОВІ МІЖДОМЕНСЬКОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗА ОБМЕЖЕНИМИ ДАНИМИ (с. 47–55)

Margulan Nurtay, Gaukhar Alina, Ardak Tau

У цьому дослідженні розглянуто автоматизовану багатокласову семантичну сегментацію зображень мазків Папаніколау, що використовуються для виявлення раку шийки матки. Ефективність існуючих методів глибокого навчання часто обмежена через брак маркованих даних, високу морфологічну мінливість клітин шийки матки, перекриття структур, шум, низьку контрастність та артефакти зображення, характерні для цитологічних зразків.

У цьому дослідженні запропоновано підхід міждоменого перенесення навчання, яка адаптує попередньо навчені глибокі нейронні мережі до завдання багатокласової сегментації мазків Папаніколау. Всі мережі були попередньо навчені на великомасштабних наборах даних природних зображень. В експериментах удосконалювалися та систематично порівнювалися як згорткові нейронні мережі, так і моделі на основі Transformer, включаючи гібридні конфігурації. Продуктивність мережі оцінювалася за допомогою кількісних метрик (Dice score, IoU, HD95), а також якісної візуальної оцінки країв та меж сегментації.

Результати, отримані в експериментах, показали, що архітектури на основі Transformer, зокрема SegFormer, значно перевершують згорткові моделі при обробці шумних та неоднорідних цитологічних даних. Використовуючи спеціалізовані стратегії доповнення даних, розроблені спеціально для медичної візуалізації, SegFormer збільшив показники Dice до 0,95 для всіх класів, а також покращив точність визначення країв та стійкість до артефактів та аліасингу клітин.

Багатомасштабне вилучення ознак та моделювання глобального контексту виявилися важливими для точної ідентифікації клітинних структур в умовах обмеженого обсягу даних. Результати, отримані в дослідженні, можуть допомогти в розробці надійних автоматизованих діагностичних інструментів для допомоги цитопатологам, а також для підвищення загальної точності та ефективності програм скринінгу раку шийки матки.

Ключові слова: трансферне навчання, мазок Папаніколау, рак шийки матки, сегментація, глибоке навчання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352116

ОПТИМІЗАЦІЯ ВТРАТ ПАКЕТІВ КАНАЛУ В БЕЗДРОВОВИХ СИСТЕМАХ ДАТЧИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЬНОГО ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ (с. 56–67)

Ainur Ormanbekova, Anar Khabay, Yerkebulan Tuleshov, Nurlan Sarsenbayev, Zhazira Julayeva, Serikbek Ibekeyev, Maral Abulkhanova Askhat Tlegenov, Magzhan Igen

Об'єктом дослідження є бездротова мережева система керування (WNCS) стандарту IEEE 802.15.4 (2,4 ГГц), яка замикає петлю через бездротову сенсорну мережу. Завмирання та перешкоди збільшують втрати та затримки пакетів, знижуючи запаси стійкості та якість керування. Невирішеною проблемою є відсутність єдиної моделі наскрізних втрат (E2E), яка б пов'язувала якість сигналу РНУ, багатострибкову маршрутизацію та доступ до середовища із поведінкою замкнутого циклу та могла б бути вбудована в синтез контролера. Модель каналу на основі SINR (втрати на шляху, логарифмічно нормальне затінення, багатопшляхові завмирання) відображається на BER та ймовірність помилки пакетів; втрати E2E для однострибкових та багатострибкових маршрутів отримуються за допомогою процесів Бернуллі та Маркова зі скінченними станами (FSMC). Для перевірки оригінальні траси пакетів фіксуються за допомогою sniffера/реєстратора IEEE 802.15.4 та зберігаються перед обробкою (позначка часу, ідентифікатор вузла, порядковий номер, RSSI/LQI та результат доставки) для обчислення PER, затримки та пакетності, а також для параметризації відображення SINR-PER та моделей втрат. Моделювання показує, що TDMA/TSCN досягає до 40% менших втрат, ніж CSMA/CA, тоді як втрати E2E зростають з 3% до 32% зі збільшенням кількості стрибків від 1 до 8. Спільне проектування на основі MPC спільно адаптує потужність передачі, період дискретизації та повторні передачі. Порівняно з базовим рівнем LQR з фіксованими параметрами, PER E2E зменшується з 4,45% до 3,66%, середня затримка з 0,20 с до 0,12 с, а інтегральна абсолютна похибка - на 50%. Переваги пояснюються зменшенням конкуренції при плануванні TDMA та адаптації MPC на основі предикторів. Цей підхід спрямований на промисловий моніторинг та керування з фіксованою дискретизацією, повільно змінними перешкодами та статичними багатострибковими топологіями, де параметри можна ідентифікувати офлайн та використовувати для онлайн-адаптації MPC.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, WNCS, втрата пакетів, SINR, процес Бернуллі, ланцюг Маркова зі скінченними станами, TDMA, CSMA/CA, MPC.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351773

РОЗРОБКА АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОГЛЯДУ ДЛЯ ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ (с. 68–77)

А. А. Симкін, О. В. Міца, Ю. В. Горшко, Г. Ю. Цибко, В. В. Шакоцько

Об'єктом дослідження є технологія відстеження погляду (eye-tracking) як засіб забезпечення доступності освіти для осіб із тяжкими порушеннями опорно-рухового апарату. Наразі розроблено низку асистивних технологій, що мають значний освітній потенціал, але їх автономне застосування переважно пов'язане з такими труднощами, як залежність від нестабільності бездротових мереж чи зовнішніх обчислювальних ресурсів. Необхідність подолання технологічного розриву між можливостями асистивних технологій та їхньою реальною автономністю становить проблему, на розв'язання якої спрямована ця робота.

В результаті дослідження створена повністю автономна архітектура на базі VR (virtual reality) шоломів (Meta Quest), що забезпечує виконання всіх процесів обробки зображень очей та керування інтерфейсом безпосередньо з використанням процесора пристрою. Було вдосконалено апаратну частину (здійснені мініатюризація рамок, перехід на дротовий USB-інтерфейс), розроблено програмне забезпечення мовою Rust у форматі OpenXR API (Application Programming Interface) шару. Це дало можливість позбутися мережних затримок і забезпечити роботу системи, стійку до будь-яких умов. Пряма взаємодія з апаратним забезпеченням шолома забезпечується ефективною оптимізацією згорткових нейронних мереж та використанням низькорівневих системних викликів. Створено імерсивний графічний інтерфейс користувача (GUI), який успішно протестований для налаштування та калібрування системи. GUI став доступним безпосередньо у віртуальному просторі шолома.

Одержані результати можуть знайти застосування в індивідуальному навчанні вдома, інклюзивних закладах освіти, реабілітаційних центрах, які організують навчання осіб із тяжкими порушеннями опорно-рухового апарату.

Ключові слова: eye-tracking, інклюзивна освіта, рухові порушення, VR-шолом, доступність освіти, адаптивні технології.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.350949

ПОКРАЩЕННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ МОВЛЕННЯ НА ТЕКСТ ДЛЯ ІНДОНЕЗІЙСЬКОЇ МОВИ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДИФІКОВАНОГО ТРАНСФОРМАТОРА (с. 78–90)

Ratna Atika, Suci Dwijayanti, Bhakti Yudho Suprpto

Об'єктом цього дослідження є архітектура автоматичного розпізнавання мовлення (APM) на основі трансформатора, навчена з використанням набору даних індонезійської мови, що складається з аудіозаписів та відповідних транскриптів. У цьому

дослідженні розглядається розробка системи АРМ для індонезійської мови, яка досі класифікується як мова з низьким рівнем ресурсів, особливо з точки зору доступності набору даних та продуктивності моделі. Проблема, що розглядається в цьому дослідженні, полягає в обмеженій продуктивності стандартної моделі трансформатора в точному розпізнаванні індонезійської мови. Щоб подолати це обмеження, було запропоновано модифікацію кодера, що інтегрує блоки згорткового та візуального трансформатора (ВТ), та порівняно з базовою моделлю. Дані були попередньо оброблені шляхом перетворення монофонічного аудіо 16 кГц, сегментації паузи, фільтрації передвиборчого акценту, вилучення логарифмічної спектрограми Mel, нормалізації та токенизації підслів за допомогою SentencePiece з байтовим парним кодуванням. Набір даних був розділений на навчальний, валідаційний та тестовий набори у співвідношенні 80:10:10, що склалися з 63 952, 7 994 та 7 994 зразків відповідно. Узагальнення моделі було покращено за допомогою методу доповнення даних SpecAugment. Експериментальні результати показують, що стандартна модель досягає коефіцієнта помилок слів 0,162 та коефіцієнта помилок символів 0,121, тоді як модифікована модель зменшує коефіцієнт помилок слів до 0,158, а коефіцієнт помилок символів до 0,118. Значення цього відкриття полягає в покращеному представленні ознак, що створюється модифікованим кодером, де згортковий блок фіксує локальні акустичні патерни, а блок ВТ покращує моделювання глобального контексту на спектрограмі. Цей додатковий механізм пояснює зменшення помилок на рівні слів, що є вирішальним для надійної системи перетворення мовлення в текст. Отже, запропоновану модель можна застосовувати для двостороннього зв'язку в реальному часі в сервісних роботах.

Ключові слова: АРМ, модифікований трансформатор, SentencePiece, індонезійський набір даних, глибоке навчання.