# Розпаралелювання стиску зображень зі сканерів земної поверхні

Тарас Грицько
кафедра електронних обчислювальних машин
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
taras.l.hrytsko@lpnu.ua

Валерій Глухов
кафедра електронних обчислювальних машин
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
valerii.s.hlukhov@lpnu.ua

# Parallelization of Image Compression from Earth Surface Scanners

Taras Hrytsko
dept. of Electronic Computing Machines
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
taras.l.hrytsko@lpnu.ua

Valerii Hlukhov
dept. of Electronic Computing Machines
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
valerii.s.hlukhov@lpnu.ua

***Анотація*** **— У роботі запропоновано три методи розпаралелювання процесу стиснення відеопотоків від встановлених на мікросупутниках сканерів земної поверхні, визначено залежність інтенсивності відеопотоку від параметрів супутника, на якому розміщено сканер, а також кількість ядер вузла стиснення інформації в залежності від параметрів супутника та характеристик одного ядра**

***Abstract*** **— This work proposes three methods for parallelizing the compression of video streams from Earth surface scanners installed on microsatellites. It establishes the relationship between video stream intensity and the parameters of the satellite carrying the scanner, and also determines the required number of cores in the data compression unit based on the satellite's parameters and the characteristics of a single core.**

***Ключові слова— JPEG-LS; стиснення відео; розпаралелювання***

***Keywords— JPEG-LS; video compression; parallelization***

## I. Вступ

JPEG-LS, визначений стандартом [1], є методом безвтратного стиснення зображень, який використовує прогнозувальне кодування з контекстним моделюванням. Алгоритм обробляє зображення рядок за рядком, де кожен рядок залежить від попереднього для прогнозування, що робить процес послідовним. Апаратно вузол стиснення відеопотоку можна реалізувати на програмованій логічній матриці (ПЛІС). Функціонально закінчений вузол в складі ПЛІС прийнято називати ядром. Для сучасних сканерів, які генерують великі обсяги даних, продуктивність одного ядра стискувача (енкодера) є недостатньою, тому необхідно використовувати кілька ядер, які працюють паралельно.

Ці тези використовують матеріали та результати, отримані авторами під час науково-дослідної роботи “Інтелектуальні методи та інструменти проєктування модульних автономних кіберфізичних систем”, НДР 0124U002340 від 09.03.2024, яка проводиться на кафедрі ЕОМ Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка» у 2024-2028 роках.

## II. Параметри відеопотоку

У статті [2] було розглянуто реалізацію алгоритму на одному ядрі ПЛІС, яка забезпечувала опрацювання 1 пікселя за такт при використанні тактової частоти F=100 МГц, і, відповідно, отримати пропускну здатність V=100 Мп/с (мегапікселів за секунду). Також проаналізовано імплементацію алгоритму, реалізовану на масивах, при якій за один такт опрацьовується n=5 пікселів, а також зберігаються масиви контекстних пікселів. Ця реалізація, оптимізована під ПЛІС ZYNQ-7020, дозволяла досягти частоти F=186 МГц і отримати пропускну здатність V=925 Мп/с [3].

Дана розробка актуальна для використання з високопродуктивними супутниковими сканерами земної поверхні, що працюють у складі системи дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Наприклад, із супутником, подібним до українського супутника оптико-електронного спостереження «Січ-3О» (Рис. 1) [4].

Швидкість відеопотоку, або бітрейт (B від англ. Bit rate) визначається за даною формулою (1), де W – кількість пікселів у рядку, R – частота рядків, D – кількість бітів на один піксель Мікросупутники в основному літають на висоті h = 500-700 км, зі швидкістю v = 7619 м/с. Якщо врахувати роздільну здатність сканера у L=0,5 м/піксель (у монохроматичному діапазоні), ширину смуги у H=17 км, а також N=8 бітів на один піксель, можна визначити швидкість відеопотоку (числові значення прийнято для супутника Січ-3О):

$$B_{total} = W * R * D$$

$$W = \frac{H}{L} = \frac{17000}{0.5} = 34000 \text{ пікселів у рядку}$$

$$R = \frac{v}{L} = \frac{7619}{0.5} = 15238 \text{ рядків/с}$$

$$B_{\text{total}} = W * R * D = 34000 * 15238 * 8 \approx 4,15 \text{ Гбіт/с}$$

Враховуючи об'єм даних, що необхідно обробляти, у його бортовій системі збору і накопичення наукової інформації (СЗНІ) перед передаванням необхідно застосовувати попереднє стиснення даних та проміжне запам'ятовування стиснутої відеоінформації.

Рис. 1 Супутник «Січ-3О»

## III. Варіанти розпаралелювання

Застосування кількох ядер, реалізованих на ПЛІС, при паралельній роботі дозволить збільшити швидкість обробки вхідного потоку пропорційно кількості ядер. Для паралельної роботи кількох ядер на вході кожного ядра необхідно використовувати буфер FIFO, а також налаштувати тактовий перетин (CDC, Cross Domain Clock) для узгодження частот ядер та основних елементів.

Методи розпаралелювання включають (Рис. 2):

- Горизонтальне розпаралелювання [5]: зображення ділиться на горизонтальні смуги по M рядків, кожна смуга обробляється окремим ядром, а ядра працюють у циклічному порядку, коли одне ядро завершує свою роботу, воно переходить до наступної смуги, яка ще не оброблялася.
- Вертикальне розпаралелювання [6]: кадр ділиться вертикально на N стовпців, кожний стовбець обробляється окремим ядром, з урахуванням того, що кількість ядер має бути такою, щоб коли i-те ядро закінчує стиск свого стовпця, воно переходить до наступного стовпця, який ще не оброблявся.
- Блочне розпаралелювання [7] кадр ділиться вертикально на N частин і горизонтально на M рядків, кожний блок обробляється окремим ядром, з урахуванням того, що кількість ядер має бути такою, щоб коли i-те ядро закінчує стиск свого блоку, воно переходить до стиску наступного блоку, який ще не оброблявся.

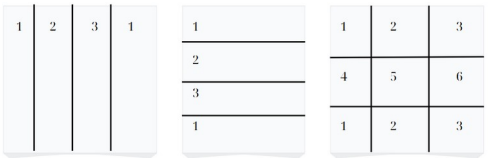


Рис. 2 Принцип поділу вхідного зображення на стовбці (зліва), смуги (посередині) та блоки (справа)

Виходячи з вимог сучасних сканерів [8] та експериментальних результатів, продуктивність одного ядра (близько $B_{single}$ =1,434 Гбіт/с [2]) є недостатньою для досягнення необхідної швидкості $B_{total}$ = 4,15 Гбіт/с. Для забезпечення потрібної швидкості обробки даних відповідно необхідно $N=B_{total}/B_{single}=2,789=3$ паралельні ядра, що дозволить забезпечити безперервну обробку потоку без затримок.

При горизонтальному розпаралелюванні перший рядок кожної смуги буде оброблятися як перший рядок нового зображення, що може знизити ефективність стиснення на межах смуг. Тобто для N ядер буде втрата ефективності стиснення на N-1 межах.

Вертикальне розпаралелювання передбачає поділ зображення на стовпці, кожний з яких обробляється окремим ядром. Кожне ядро стискає свій стовбець рядок за рядком, але для кожного стовпця потрібна інформація на межі від попереднього ядра. Відповідно як у горизонтальному розбитті є втрати на кожному першому рядку смуги, у вертикальному є втрати контексту на кожному першому пікселі стовпця.

Блочне розпаралелювання дозволяє краще масштабувати поділ зображення на велику кількість ядер, особливо у ситуаціях, коли рядок задовгий для одного ядра (що виключає тільки горизонтальне розбиття), але закороткий для подальшого поділу на стовпці (що виключає тільки вертикальне розбиття), тож зображення ділиться на блоки з заданою довжиною та шириною. Однак крім плюсів, таке розбиття має очевидні мінуси

двох попередніх варіантів, тобто втрату контексту для першого рядка і першого стовпця кожного блоку. Дослідження [7] показує, що поділ на блоки, наприклад, MxN=64x64 пікселів, може бути ефективним, але M та N мають бути достатньо великими, щоб мінімізувати вплив меж.

## Висновки

У роботі було запропоновано три методи розпаралелювання процесу стиснення відеопотоків від сканера земної поверхні мікросупутника, таких як розпаралелювання вхідного потоку зображення горизонтально (на лінії шириною M рядків), вертикально (на стовбці шириною N пікселів) та блочно (на блоки розмірами M*N пікселів). Визначено залежність інтенсивності відеопотоку від параметрів супутника, на якому розміщено сканер, а також кількість ядер вузла стиснення інформації в залежності від параметрів супутника та характеристик одного ядра. Розраховано швидкість відеопотоку для супутника «Січ-3О», який для 8-бітного монохромного сканера складає 4,15 Гбіт/с. Також розраховано кількість ядер вузла стиснення, яка склала 3 ядра, якщо продуктивність одного ядра 1,434 Гбіт/с.

## Література References


[1] M. J. Weinberger, G. Seroussi, and G. Sapiro, “The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS,” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 9, no. 8, pp. 1309–1324, Aug. 2000, doi: 10.1109/83.855427.

[2] T. Hrytsko, D. Lenskiy, and V. Hlukhov, “Review of the Capabilities of the Jpeg-ls Algorithm for Its Use With Earth Surface Scanners,” Scientific journal “Computer Systems and Networks,” vol. 6, p. 15, Dec. 2024, Accessed: Mar. 06, 2025. [Online]. Available: https://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/volume-6-number-2-2024/review-capabilities-jpeg-ls-algorithm-its-use, doi:10.23939/csn2024.02.015

[3] X. Wang, L. Gong, C. Wang, X. Li, and X. Zhou, “UH-JLS: A Parallel Ultra-High Throughput JPEG-LS Encoding Architecture for Lossless Image Compression,” in 2021 IEEE 39th International Conference on Computer Design (ICCD), Oct. 2021, pp. 335–343. doi: 10.1109/ICCD53106.2021.00060.

[4] “Січ-3О.” Accessed: May 04, 2025. [Online]. Available: https://www.nkau.gov.ua/ua/space-complexes-ua/spacecraft/15-menu-1/spacecraft/616-sich-3o

[5] Ž. Regoršek, A. Gorkič, and A. Trost, “Parallel Lossless Compression of Raw Bayer Images on FPGA-Based High-Speed Camera,” Sensors, vol. 24, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24206632.

[6] “(PDF) Hardware Implementation of 2D convolution on FPGA,” in ResearchGate, Accessed: May 06, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/369038700_Hardware_Implementation_of_2D_convolution_on_FPGA

[7] H. Duan, Y. Fang, and B. Huang, “Parallel design of JPEG-LS encoder on graphics processing units,” JARS, vol. 6, no. 1, p. 061508, Sep. 2012, doi: 10.1117/1.JRS.6.061508.

[8] S. L. Ustin and E. M. Middleton, “Current and Near-Term Earth-Observing Environmental Satellites, Their Missions, Characteristics, Instruments, and Applications,” Sensors, vol. 24, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24113488.