УДК 519.15:621.372 https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.29

В. В. РІЗНИК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизованих систем управління
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-3880-4595

О. Б. БІЛИК
студент кафедри автоматизованих систем управління
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-3589-5401

О. М. ДЕМ'ЯНІВ
студент кафедри автоматизованих систем управління
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0005-6361-416X

С. С. ІВАСІВ
студент кафедри автоматизованих систем управління
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0007-3406-7376

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ВЕКТОРНИХ КОДІВ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ МАСИВІВ ДАНИХ

У цій роботі розглянуто метод опрацювання масивів даних у просторовому полі системи координат тора, побудована на множині комбінаційних сум векторних елементів комбінаторної конфігурації типу «ідеальна кільцева в'язанка» (ІКВ) як базису цієї системи координат, де базис – це підмножина множини наборів координат решітки тора, утвореної послідовним додаванням векторних елементів ІКВ, які, разом з їхніми модульними сумами, заповнюють названу решітку. Досліджено особливості опрацювання дво- і багатовимірних масивів даних у просторовому полі координатної системи тора з використанням оптимальних кільцевих монолітно-групових кодів, сформованих в базисі цієї системи. Встановлено взаємно однозначну відповідність між множиною наборів категорій атрибутів вхідних даних і множиною наборів координат просторової решітки тора, число осей системи координат якої визначає кількість категорій, а число позицій на кожній осі – кількість атрибутів кожної категорії. Обґрунтовано доцільність застосування оптимальних векторних монолітно-групових кодів для опрацювання даних в просторовому полі такої системи координат, що дає змогу зменшити використання машинного часу та пам'яті для опрацювання даних, завдяки кодуванню наборів даних за двома і більше категоріями атрибутів одночасно. З'ясовано, що загальна кількість вузлових точок координатної сітки тора обумовлює потужність методу оптимального кодування наборів даних, а її розміри і розмірність окреслюють відповідну систему категоризації атрибутів. Наведено приклад кодування даних за двома категоріями атрибутів в базисі системи координат тора, що дає змогу зрозуміти сутність зазначеного методу опрацювання даних. Передбачена можливість застосування оптимальних векторних кодів для шифрування опрацьованих даних під час їх пересилання каналами зв'язку.

Ключові слова: *комбінаторна оптимізація, система координат тора, індексація даних, потужність методу кодування, оптимальний кільцевий монолітно-груповий код, шифрування даних.*

V. V. RIZNYK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Control Automated Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-3880-4595

O. B. BILYK
Student at the Department of Control Automated Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-3589-5401

O. M. DEMIANIV
Student at the Department of Control Automated Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0005-6361-416X

S. S. IVASIV
Student at the Department of Control Automated Systems
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0007-3406-7376

PROSPECTS FOR THE USE OF OPTIMAL VECTOR CODES FOR DATA PROCESSING

In this paper the method of processing data arrays in the spatial field of the torus coordinate system is considered, based on the set of vector elements combinational sums of the «Ideal Ring Bundle» (IRB) combinatorial configuration as the basis of this coordinate system, where the basis is a subset of the coordinate sets of the torus grid, which formed by sequential addition of vector elements of IRB, which together with their modular sums fill the underlying grid. The peculiarities of processing two- and multidimensional data arrays in the spatial field of the torus coordinate system using optimal ring monolithic-group codes formed in the basis of this system are investigated. A one-to-one correspondence between the set of sets of categories of attributes of the input data and the set of coordinate sets of the spatial grid of the torus is established, the number of axes of the coordinate system of which determines the number of categories, and the number of positions on each axis – the number of attributes of each category. The expediency of using optimal ring monolithic-group codes for data processing in the spatial field of such a coordinate system is substantiated, which allows reducing the use of machine time and memory for data processing, due to the encoding of data sets by two or more categories of attributes simultaneously. It is found that the total number of nodal points of the coordinate grid of the torus determines the power of the method of optimal coding of data sets, and its dimensions and dimensions outline the corresponding system of attribute categorization. An example of data encoding by two categories of attributes in the basis of the torus coordinate system is given, which makes it possible to understand the essence of the specified method of data processing. It is possible to use optimal vector codes to encrypt the processed data during their transmission via communication channels. It is possible to use optimal vector codes to encrypt the processed data during their transmission via communication channels.

Key words: *combinatorial optimization, torus coordinate system, data indexing, coding method power, optimal ring vector monolithic-group code, data encryption.*

Постановка проблеми

У зв'язку з прискоренням нагромадження інформації набори даних набувають таких великих розмірів, що традиційні способи та підходи, які здебільшого засновані на рішеннях класу бізнесової аналітики та системах управління базами даних, не можуть бути застосовані для їх опрацювання. Для вирішення цієї проблеми у світі поширюються різні підходи до опрацювання «великих даних». Останнім часом для підвищення ефективності опрацювання великих даних запропоновано і розроблено велику кількість нових концепцій, паралельних алгоритмів, засобів обробки, платформ і додатків [1], [2], [3], [4], [6], [7], [8], [12], [13], [14], [15], [16]. Управління великими просторовими векторними даними представлено в [1], [2], [13], [14], [15], [16]. У роботах [4], [7], [8], [12] висвітлюються перспективи та проблеми технологій отримання даних у сфері дистанційного зондування Землі. Методика складання картографічної процедури, яка виконує фільтрацію, сортування і зведені операції великих даних, представлена на IEEE International Conference on Data Engineering [1]. Розробку реверсної моделі швидкого перетворення координат великих даних для циліндричної проекції ми бачимо в роботі [16]. Стаття [14] містить швидку багатовимірну ансамблеву емпіричну декомпозицію режимів для аналізу великих просторово-часових наборів даних. Структура, яка поєднує хмарні та високопродуктивні обчислення для паралельної картографічної проекції векторних великих просторових даних, розглянута в [2], [13]. Ідея топологічних координат тороїдних хімічних структур узгоджується з описом фізики тороїдальної плазми [3]. Значна частина публікацій стосується великих даних про Землю [8], [12], [13], [15], [16], а в [17] наведено опис багатовимірних систем автоматичного керування.

Одним з підходів до вирішення цієї проблеми, що тут розглядається, є опрацювання даних, застосовуючи оптимальні векторні коди, сформовані в базисі багатовимірних систем координат.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – дослідити ефективність застосування оптимальних векторних кодів для опрацювання масивів даних з багатьма категоріями атрибутів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно проаналізувати останні дослідження та публікації, розробити метод опрацювання масивів даних в просторовому полі координат, порівняти розроблений метод з відомими методами, обговорити отримані результати дослідження та зробити відповідні висновки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розглядаючи останні дослідження та публікації, можна бачити, що значна їх частина стосується великих даних про Землю [8], [12], [13], [15], [16]. Для їх обробки доводиться застосовувати різні методи: паралельні інфраструктури аналізу просторових даних, що трактується як досягнення в геоінформаційних системах [8], паралельні картографічні проекції векторних даних, в яких поєднані хмарні обчислення з графічними процесорами [13], розкладання сингулярних значень у багатовимірних масивах великих даних [6], швидкодіючі багатовимірні декомпозиції режимів ансамблю для аналізу великих просторово-часових наборів даних [14]. Геометричні обчислювальні алгоритми завжди дуже складні і трудомісткі, що робить обробку великих просторових даних надто повільною, або навіть неможливою [8].

Огляд основних літературних джерел показав, що зараз у науковому світі складається загальна тенденція стосовно опрацювання великих даних, яка ґрунтується здебільшого на використанні просторових проекцій та візуалізації векторних великих просторових даних, аналізі просторових даних у режимі реального часу [7], [8] і дистанційному зондуванню Землі [4], [7], [12]. Використання просторових проекцій, хоч і забезпечує масштабне просторове моделювання великих даних при загальній системі координат, однак алгоритмічна складність картографічних проекцій залишається нагальною обчислювальною проблемою. Розроблення багатовимірних систем автоматичного керування одночасно кількома параметрами фізичного процесу також вимагають громіздких обчислювань [17].

Аналіз останніх публікацій дав змогу встановити, що для підвищення ефективності обчислень, пов'язаних з опрацюванням векторних даних, доцільно скористатися перевагами оптимальних векторних кодів, утворених на багатовимірних комбінаторних конфігураціях [5], таких як зінгерові різницеві множини [11], багатовимірні моделі систем, і моделі багатовимірних оптимальних систем кодування [10].

Викладення основного матеріалу дослідження

Метод опрацювання векторних даних базується на використанні теоретичних положень класичної теорії комбінаторних конфігурацій [11] та застосуванні оптимальних векторних кодів, підґрунтям для побудови яких стали векторні комбінаторні конфігурації типу «ідеальних кільцевих в'язанок» (ІКВ) [9]. Структура векторних ІКВ представляє собою впорядкований за кільцевою схемою набір векторів, комбінаційні суми яких утворюють систему координат на поверхні тора, що дає змогу формувати в базисі цієї системи набори індексованих категорій атрибутів у вигляді кортежів цілих додатних чисел для їх кодування за допомогою оптимальних векторних монолітно-групових кодів. Кожній позиції такого коду присвоєно числове значення у вигляді відповідного набору індексованих категорій атрибутів для їх кодування та подальшого опрацювання векторних наборів даних у базисі просторової системи координат, де базис – це підмножина множини наборів координат цієї системи, породженої послідовним додаванням останніх. Коди цього класу є оптимальними по відношенню до інших кодів цього класу, оскільки комбінаційні суми числових значень його вагових розрядів вичерпує множину кодових комбінацій, сформованих у базисі цієї системи координат. Дозволені комбінації оптимального монолітно-групового коду формуються у вигляді двох послідовно розміщених за кільцевою схемою груп однойменних символів, що дає змогу швидко і просто виявляти та виправляти помилки за принципом появи хоча б одного символу «1» серед нулів, або символу «0» серед одиниць. Кодування базується на ваговій системі кільцевого n-позиційного монолітно-групового коду з t-вимірними ваговими розрядами, кодові комбінації якого формуються послідовним додаванням базових t-вимірних векторів за кільцевою схемою з урахуванням відповідних модулів $m_1, m_2,\ldots, m_t$. Множина цих векторів, разом з множиною породжених ними вектор-сум, набуває вигляду t-вимірної координатної сітки з розмірами $m_1\times m_2\times\ldots\times m_t$, яка окриває поверхню $(t+1)$-вимірного тора.

Розглянемо математичну модель t-вимірних наборів даних, яка має вигляд кільцевої n-послідовності t-кортежів $((k_{11}, k_{12}, \ldots, k_{1t}),\ (k_{21}, k_{22}, \ldots, k_{2t}),\ \ldots,\ (k_{i1}, k_{i2}, \ldots, k_{it}), \ldots,\ (k_{n1}, k_{n2}, \ldots, k_{nt}))$, де $k_{i1}\equiv k_i \pmod{m_1}$, $k_{i2}\equiv k_i \pmod{m_2}$, …, $k_{it}\equiv k_i \pmod{m_t}$. Така система описується параметрами n, m_1, m_2, …, m_t, де n – число t-кортежів, які є базисними векторами t-вимірної системи координат, утвореної цими векторами. Числові значення модулів m_1, m_2, …, m_t які встановлюють розміри t-вимірної координатної сітки $m_1\times m_2\times\ldots\times m_t= n(n-1)$, де m_1, m_2, …, m_t – розміри кільцевих осей цієї сітки.

В основу методу закладено принцип комбінаторної оптимізації вагової системи зваженого n-позиційного коду, розрядам якого присвоєно значення базисних векторів t-вимірної системи координат. Ваги розрядів оптимальних векторних кодів обрані так, щоб множиною усіх векторних сум, утворених комбінаційним додаванням цих вагових розрядів, можна було покрити множину вузлових координат t-вимірної решітки тора.

Наприклад, на кільцевій n – послідовності чотирьох (n=4) 2-кортежів (t=2) із ваговими розрядами ((0,1), (1,0), (0,2), (2,2)) можна утворити $n(n$-1)=12 вектор-сум за комплексним модулем (mod m_1, mod m_2), включно з базовими векторами, де m_1= 3, m_2 =4:

(0,1), (1,0), (0,2), (2,2); (1,1)≡((0,1)+(1,0)), (1,2)≡((1,0)+(0,2), (2,0)≡((0,2)+(2,2)), (2,3)≡((2,2)+(0,1)); (0,0)≡((1,0)+(0,2)+(2,2)), (0,0)≡((1,0)+(0,2)+(2,2)), (0,3)≡((2,2)+(0,1)+(1,0)), (1,3)≡((0,1)+(1,0)+(0,2)), (0,3)≡((2,2)+(0,1)+(1,0)), (1,3)≡((0,1)+(1,0)+(0,2)), (2,1)≡((0,2)+(2,2)+(0,1)).

Легко бачити, що множина цих векторів взаємно однозначно відповідає множині вузлових точок координатної сітки $m_1 \times m_2 = 3 \times 4$ тора, а їх кількість досягає апріорі максимального значення, коли n=4. Тому коди з такими властивостями належать до класу оптимальних векторних кодів. Множина комбінаційних сум, утворених послідовним додаванням вагових розрядів оптимального векторного коду, формує просторову систему координат, яка окриває поверхню тора, вичерпуючи кількість різних способів утворення вузлових точок. Цим пояснюється перевага оптимальних векторних кодів у порівнянні з відомими. Кодування двовимірних (t=2) векторних сигналів у базисі просторового поля координатної сітки тора здійснюється оптимальним кільцевим монолітно-груповим векторним кодом [9, 10], ваги розрядів якого є елементами ІКВ, а кодові комбінації утворюються шляхом відліку відповідних вектор-сум від спільної точки з координатами (0, 0) на двох (t=2) взаємно ортогональних кільцевих осях координатної сітки тора з розмірами $m_1 \times m_2 = 3 \times 4$. Таким чином, кожному 2 набору категорій атрибутів взаємно однозначно відповідає рівно одна двійкова кодова комбінація, утворена на чотирьох (n=4) двовимірних (t=2) вагових розрядах (0,1), (1,0), (0,2), (2,2), вичерпуючи множину числових значень цих наборів.

Приклад кодування масивів даних за двома (t=2) категоріями атрибутів в базисі ((0,1), (1,0), (0,2), (2,2)) системи координат 3×4 тора ілюструє таблиця 1.

Таблиця 1

Кодування масивів даних за двома (*t*=2) категоріями атрибутів в базисі ((0,1), (1,0), (0,2), (2,2)) системи координат 3×4 тора

п/п	Категорії арибутів		Ваги розрядів двовимірного (*t*=2) оптимального векторного коду			
	Категорія 1	Категорія 2	(0,1)	(1,0)	(0,2)	(2,2)
1	0	0	0	1	1	1
2	0	1	1	0	0	0
3	0	2	0	0	1	0
4	0	3	1	0	0	1
5	1	0	0	1	0	0
6	1	1	1	1	0	0
7	1	2	0	1	1	0
8	1	3	1	1	1	0
9	2	0	0	0	1	1
10	2	1	1	0	1	1
11	2	2	0	0	0	1
12	2	3	1	0	0	1

У таблиці відображено результат кодування масивів даних з двома (*t*=2) наборами категорій атрибутів в базисі системи координат тора за допомогою оптимального кільцевого монолітно-групового коду з ваговими розрядами ((0,1), (1,0), (0,2), (2,2)). Перше число закодованого набору вказує на один із трьох (m_1=3), а друге – чотирьох (m_2=4) індексованих атрибутів першої і другої категорій атрибутів відповідно, що дає змогу кодувати дані за двома категоріями атрибутів одночасно. Заповнені таблиці, в свою чергу, можуть підлягати індексації за номерами назв, пакетів, процедур тощо в знову обраній з банку базисів систем координат та подальшому опрацюванню в мережі бази даних, підтримуючи комплекси стандартних бібліотек мов програмування. Для опрацювання даних з більшим числом категорій атрибутів обирають базиси, які породжують системи просторових координат з потрібними геометричними характеристиками. Крім того, існує можливість шифрування опрацьованих даних, наприклад, періодичним перейменуванням номерів осей координат, переставлянням *t*- вимірних вагових розрядів тощо. Інформація, яка закодована у сигналах *t*- вимірного монолітно-групового коду з обмеженим числом перехідних енергетичних рівнів підвищує ступінь захисту від впливу зовнішніх завад.

У цій праці, на відміну від публікацій [1], [2], [3], [4], [6], [7], [8], [12], [13], [14], [15], [16], [17], розроблено новий метод опрацювання даних у просторовому полі координатної системи тора, побудованій на множині комбінаційних сум структурних елементів багатовимірної комбінаторної конфігурації типу «ідеальна кільцева в’язанка» (ІКВ) з використанням оптимальних монолітно-групових кодів, сформованих в базисі цієї системи.

База даних, яка забезпечує взаємодію користувачів з банком базисів *t*-вимірних систем координат, містить інформацію для опрацювання *t*-вимірних наборів даних, здійснюючи цілочислове *t*-значне індексування векторних елементів, упорядкованих у вигляді базису *t*-вимірної системи координат, з наступним опрацюванням інформації та її збереження, що дає змогу вдосконалити структуру бази даних. Масиви даних можуть описуватися *t*-наборами атрибутів довільного змісту на будь-якому рівні індексації й теоретично нескінченно великим числом категорій атрибутів.

Висновки

Досліджено ефективність застосування оптимальних векторних кодів для опрацювання масивів даних з багатьма категоріями атрибутів в базисі просторової системи координат. Досліджено особливості опрацювання дво- і багатовимірних масивів даних у просторовому полі координатних систем з використанням оптимальних кільцевих монолітно-групових кодів, сформованих в базисі цієї системи. Оптимізація полягає у розширенні просторового поля системи координат, завдяки використанню комбінаційних вектор-сум, утворюваних на множині фіксованої кількості базових векторів ІКВ. Множина всіх дозволених двійкових комбінацій оптимального кільцевого монолітно-групового коду взаємно однозначно відповідає множині координат вузлових точок просторової системи відліку наборів категорій атрибутів. Для опрацювання масивів даних використовується менше, як раніше, число закодованих сигналів, що дозволяє скоротити базу даних без втрати інформації. Застосування оптимальних векторних кодів може бути доречним під час опрацювання масивів даних в потоковому режимі з можливістю їх шифрування.

Використання оптимальних векторних кодів для опрацювання масивів даних розкриває нові перспективи розвитку векторних інформаційних технологій і векторної комп'ютерної інженерії.

Список використаної літератури

1. Eldawy A., Mokbel M. F., Alharthi S., Alzaidy A, Tarek K., Ghani S. SHAHED. A MapReduce-based system for querying and visualizing spatio-temporal satellite data. *IEEE International Conference on Data Engineering*. 2015. Seoul, South Korea, 13–17 April 2015.

2. Eldawy A., Mokbel MF, Jonathan C. Hadoop Viz: A MapReduce framework for extensible visualization of big spatial data. The *32nd IEEE International Conference on Data Engineering*. 2016. 16-20 May 2016. Helsinki, Finland: IEEE, 2016. P. 601–612.

3. Laszlo I., Rassat A., Fowler P.W., Graovas A. Topological coordinates for toroidal structures. *Chemical Physics Letters: Elsevier Science B.V.* 2001. Vol. 342. 2001. P. 369–374.

4. Ma Y., Wu H., Wang L., Huang B., Ranjan R., Zomaya A., Jie W. Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*. 2015, no. 51. P. 47–60. URL: https://doi. org/10.1016/j. future.2014.10.029

5. Moore E.H., Pollatsek H.S. Difference Sets: Connecting Algebra, Combinatorics, and Geometry. New York: AMS, 2013. 314 p.

6. Nikos E. Mastorakis. Singular value decomposition in multidimensional arrays. *International Journal of Systems Science*. 1996. Vol.27, Iss. 7. P. 647–650. URL: https://doi.org/10.1080/00207729608929261

7. Pekturk M. K., Unal M. A review on real-time big data analysis in remote sensing applications. *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2017. Antalya, Turkey, 15–18, May 2017.

8. Ray S., Simion B., Brown A.D., Johnson R. A parallel spatial data analysis infrastructure for the cloud. *ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems.* 2013. 5–8 November 2013. Orlando, FL, USA.

9. Riznyk V. Multi-dimensional Systems Based on Perfect Combinatorial Models, *Multidimensional Systems: Problems and Solutions*. 1998. London: IEE, Savoy Place, P. 5/1–5/4.

10. Riznyk V. Multi-modular Optimum Coding Systems Based on Remarkable Geometric Properties of Space. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer. 2017. Vol. 512. P. 129–148. URL: https://doi. org/10.1007/978-3-319-45991-2_9

11. Singer J. Division of mathematics: perfect difference sets. *Tranactions of the New York Academy of Sciences.* 1966. Vol. 28, Iss. 7, Series II. P. 883–888. URL: https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1966.tb02392.x

12. Sun Z., Shen J., Zhu Y. Big data for remote sensing: Challenges and opportunities Big data for remote sensing. *Challenges and opportunities/ IEEE*. 2016. Vol. 104, no. 11. P. 2207–2219. URL: https://doi.org/10.1109/Jproc. 2016.598228

13. Tang W., Feng W. Parallel map projection of vector-based big spatial data: Coupling cloud computing with graphics processing units. *Computers, Environment and Urban Systems.*2014. Vol. 61. P. 187–197. URL: https: //doi.org/10.1016/j. compenvurbsys.2014.01.001

14. Wu Z., Feng J., Qiao F., Tan Z. – M. Fast multidimensional ensemble empirical mode decomposition for the analysis of big spatio-temporal datasets. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 2016. Vol. 374(2065), 2015.01.97

15. Xiaochuang Y., Li Guoqing. Big spatial vector data management: a review. *Big Earth Data*. 2018. Vol. 2, no. 1. P. 108–129. URL: https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1432115

16. Ye S., Yan T., Yue Y., Lin W., Li L.,Yao X., Zhu D. *Computers & Geosciences* . 2016. Vol. 89. P. 44–56. URL: https:// doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.007

17. Жук К.Д., Тунік А.А., Чинаєв П.І. Багатовимірні системи автоматичного керування. *Енциклопедія кібернетики*. 1973. Т. 1. С. 140–142.

References

1. Eldawy,A., Mokbel, M. F. , Alharthi, S., Alzaidy,A, Tarek, K., & Ghani, S. SHAHED. (2015). A MapReduce-based system for querying and visualizing spatio-temporal satellite data /IEEE International Conference on Data Engineering, Seoul, South Korea, 13–17 April 2015.

2. Eldawy A., Mokbel MF, & Jonathan C. (2016). Hadoop Viz: A MapReduce framework for extensible visualization of big spatial data // The 32nd IEEE International Conference on Data Engineering, 16-20 May 2016. – Helsinki, Finland: IEEE, 2016. P. 601–612.

3. Laszlo,I., Rassat, A., Fowler, P.W., & Graovas, A.(2001). Topological coordinates for toroidal structures // Chemical Physics Letters: Elsevier Science B.V. 2001. Vol. 342. 2001. P. 369–374.

4. Ma, Y., Wu, H., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A., & Jie, W. (2015). Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities/ Future Generation Computer Systems. 2015. № 51. P. 47–60. DOI: 10.1016/j.future.2014.10.029.

5. Moore, E.H., Pollatsek H.S. (2013) "Difference Sets: Connecting Algebra, Combinatorics, and Geometry". AMS. ISBN 978-0-8218-9176-6.

6. Nikos E. Mastorakis (1996) Singular value decomposition in multidimensional arrays. International Journal of Systems Science, Vol.27, Iss. 7. P. 647–650. DOI: 10.1080/00207729608929261

7. Pekturk M. K. & Unal, M. (2017). A review on real-time big data analysis in remote sensing applications // 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, Turkey, 15–18, May 2017.

8. Ray, S., Simion,B., Brown, A.D. & Johnson,R. (2013). A parallel spatial data analysis infrastructure for the cloud // ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 5–8 November 2013. Orlando, FL, USA.

9. Riznyk V. (1998) Multi-dimensional Systems Based on Perfect Combinatorial Models, Multidimensional Systems: Problems and Solutions. London: IEE, Savoy Place, pp. 5/1–5/4.

10. Riznyk V. Multi-modular Optimum Coding Systems Based on Remarkable Geometric Properties of Space // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer. Vol. 512. 2017. P. 129–148. DOI 10.1007/978-3-319-45991-2_9

11. Singer J.(1966) Division of mathematics: perfect difference sets// Tranactions of the New York Academy of Sciences. 1966. Volume: 28, Issue: 7, Series: II, pp. 883–888. DOI: 10.1111/j.2164-0947.1966.tb02392.x

12. Sun, Z., Shen, J. & Zhu, Y. (2016). Big data for remote sensing: Challenges and opportunities Big data for remote sensing: Challenges and opportunities/ IEEE. 2016. Vol. 104, № 11. P. 2207–2219. DOI: 10.1109/Jproc. 2016.598228

13. Tang, W. & . Feng,W. (2014). Parallel map projection of vector-based big spatial data: Coupling cloud computing with graphics processing units// Computers, Environment and Urban Systems. 2014. Vol. 61. P. 187–197. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.001

14. Wu, Z., Feng, J., Qiao, F. & Tan Z. M.(2016). Fast multidimensional ensemble empirical mode decomposition for the analysis of big spatio-temporal datasets // Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2016. 374(2065), 2015.01.97

15. Xiaochuang, Y. & Li Guoqing (2018). Big spatial vector data management: a review // Big Earth Data. 2018. Vol. 2, № 1. P. 108–129. DOI: 10.1080/20964471.2018.1432115

16. Ye, S., Yan, T., Yue, Y., Lin, W., Li, L.,Yao, X. & Zhu, D. (2016). Computers & Geosciences. 89. P. 44–56. DOI:10.1016/j.cageo.2016.01.007

17. Zhuk K.D., Tunik A.A. and Chynaiev P.I. (1973) Bahatovymirni systemy avtomatychnoho keruvannia [Multidimensional systems of automatized control. Encyclopedia of cybernetics], Vol. 1, Kyiv, pp. 140–142.