

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/12>

Бунке О.С.

orcid.org/0000-0002-7945-7040

Scopus Author ID: 54954489000

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков П.В.

orcid.org/0000-0002-2790-5809

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ЗБОРУ ДАНИХ МЕРЕЖЕВИМИ ВУЗЛАМИ СИСТЕМИ ІОТ

Розглянуто ключові фактори, що стримують активне впровадження парадигми «Інтернету речей» як набору концепцій зі створення єдиної мережевої структури, що складається із електронних пристроїв, які на базі стандартизованих протоколів зв'язку у автоматичному режимі здійснюють обмін даними через центри координації. Показані обмеження пов'язані з неможливістю рівномірного покриття поверхні планети наземними вузлами інформаційних мереж, що своєю чергою вказує на пріоритет розвитку апаратно-програмних комплексів у рамках інфраструктури супутникового «Інтернету речей».

Проведена систематизація типових задач, характерних для побудови апаратно-програмної бази супутникового Інтернету речей, зокрема, сучасні тенденції, пов'язані з розробкою алгоритмів збору даних. Узагальнено схему організації супутникових розподілених інформаційних систем та вказано на можливість її оптимізації шляхом впровадження наземних центрів обробки даних. Розроблено базову математичну модель інфраструктури наземних станцій збору та обробки даних, що функціонує у рамках концепції «Інтернету речей». Запропонована методика включає у себе впровадження супутникової розподіленої інформаційної системи, програмна платформа якої базується на застосуванні алгоритмів відновлення масивів дискретних даних, а також методів просторово-часового компресійного зондування. На рівні математичного моделювання показано можливість відповідно зазначеного підходу зменшити вимоги до пропусковості інформаційного каналу шляхом обмеження інформаційного обсягу даних, які підлягають збору, завдяки застосуванню процедури вибіркового збору і реконструкції частини елементів масиву даних. Запропонована архітектура апаратно-програмної платформи інформаційного вузла супутникового «Інтернету речей», таким чином, складається з функціональних блоків кластеризації вхідних даних, отримання базової вибірки даних і відновлення даних. Вдосконалення математичної моделі при цьому включає у себе застосування як цільової функції показників стиснення вхідних даних, що дозволяє звести задачу оптимізації до математичної задачі пошуку екстремумів цільових функцій.

Ключові слова: супутниковий «Інтернет речей», розподілена інформаційна система, пропусковість інформаційного каналу, відновлення дискретних даних, кластеризація даних, просторово-часове компресійне зондування, цільова функція.

Постановка проблеми. Впровадження парадигми «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT) пов'язана з розширенням бази електронних пристроїв, а також рівня їх функціональності відповідно до обчислювального ресурсу та ефективності систем реєстрації, обробки, прийому і передачі

даних. Відповідно до концепцій, на основі яких будується парадигма IoT, організація ефективної інфраструктури має базуватися на дотриманні рівномірного розподілу центрів наземних інформаційних мереж (Terrestrial Networks, TNs) відповідно до рівня запитів користувачів, що у ряді

випадків унеможлиблюється географічними умовами зон покриття, нерентабельністю покриття з економічної точки зору, природними і техногенними катастрофами, а також веденням військових дій. Таким чином, на сьогоднішній день у галузі IoT існує широкий клас задач, що можуть бути вирішені лише на рівні впровадження концепції супутникового «Інтернету речей» (Satellitebased Internet of Things, SB-IoT) через розширення супутникових інформаційних мереж, оновлення апаратної бази та оптимізацію програмних алгоритмів. При цьому слід зазначити, що масштабування супутникових мереж є технологічно складним процесом, що характеризується надзвичайно високим кошторисом. Відповідно до цього значним чином актуалізується завдання розробки програмних алгоритмів та математичних процедур, що лежать у їх основі, які можуть бути використані для збільшення показників стиснення масивів даних за мінімізації втрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій у галузі SB-IoT базувався на визначенні типових запитів та тенденцій, характерних для супутникових інформаційних мереж [1–3]. Особливу увагу було приділено організації розподілених інформаційних мереж (Distributed Information Networks, DIS) та актуальним алгоритмам збору даних сенсорних мереж інфраструктури TNs, що базуються на зменшенні об'ємів масивів даних, які передаються у рамках сервісів SB-IoT [4–7]. Було вказано на пріоритет алгоритмів модельного подання (Model-Based Algorithms, MBA), що базуються на математичному апараті визначення параметру подібності елементів вибірки [5], алгоритмів розпізнавання зі стисненням (compressed-sensing based algorithms, CSA), що надають можливість реконструкції даних, представлених у вигляді сигналів великої розмірності [6], та алгоритмів з доставкою запиту (Query-Driven Algorithms, QDA), що скорочують час обробки великих масивів даних [7]. Було показано, що обмеження на застосування MBA- та CSA-підходів пов'язані з високим навантаженням на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу. Своєю чергою QDA-орієнтований підхід показує свою ефективність лише по відношенню до вузького класу задач, у рамках яких є можливість з високою точністю класифікувати запити на автоматичному рівні. Таким чином, проведений аналіз вказав на невирішену частину загальної проблеми організації програмної платформи супутникових інформаційних мереж, внаслідок чого було запропоновано застосувати у сфері SB-IoT математичних методів

відновлення дискретних даних [8] та просторово-часового компресійного зондування [9].

Постановка завдання. Розробці алгоритмів оптимізації процедур обробки і передачі даних у рамках SB-IoT має передувати узагальнення проблематики організації супутникових мережових структур та систематизація поставленого завдання.

Як показано на діаграмі (рис. 1), особливість налаштування інфраструктура IoT полягає у постійному рості робочих станцій, що обслуговуються відповідним сервісом (окремих терміналів, сенсорних мереж, локальних мереж, глобальної мережі Інтернет), та розширенні функціональних можливостей системи (на сьогоднішній день вона слугує не тільки для прийому та передачі даних з координуванням інформаційних потоків, але також здійснює попередню обробку і систематизацію інформаційних блоків). Завдяки цьому парадигма IoT на сьогоднішній день значно розширилась [10; 11], виділився окремий напрям регулювання транспортних потоків «Інтернет транспортних засобів» (Internet of Vehicles, IoV), що разом може бути описано у рамках парадигми «Інтернету всього» (Internet of Everything). При цьому слід зазначити технічну складність і високий кошторис масштабування інфраструктури SB-IoT (рис. 1).

У цьому разі збільшення кількості інформаційних вузлів пов'язано з запуском додаткових супутникових систем, а врахування експоненційного росту вимог на перепускність інформаційних каналів і обчислювального ресурсу системи значною мірою збільшує вагу серверних блоків і мережевого обладнання, що має бути виведено на орбіту і у ряді випадків робить проєкт недоцільним з економічної точки зору.

На сьогоднішній день типовим підходом є застосування додаткових наземних центрів систематизації та остаточної обробки масивів даних, що передають підготовлені інформаційні блоки у супутникову мережу. Слід зазначити, що під час математичного моделювання системи SB-IoT і розробки методології алгоритмів оптимізації передачі даних необхідно врахувати відповідні компоненти апаратно-програмного комплексу (рис. 2).

Таким чином, **метою дослідження** є побудова математичної моделі функціонування апаратно-програмного комплексу SB-IoT, що включає у себе як мережу супутників, так і наземні станції, а також формування на її основі методологічної бази для розробки алгоритмів оптимізації процесів

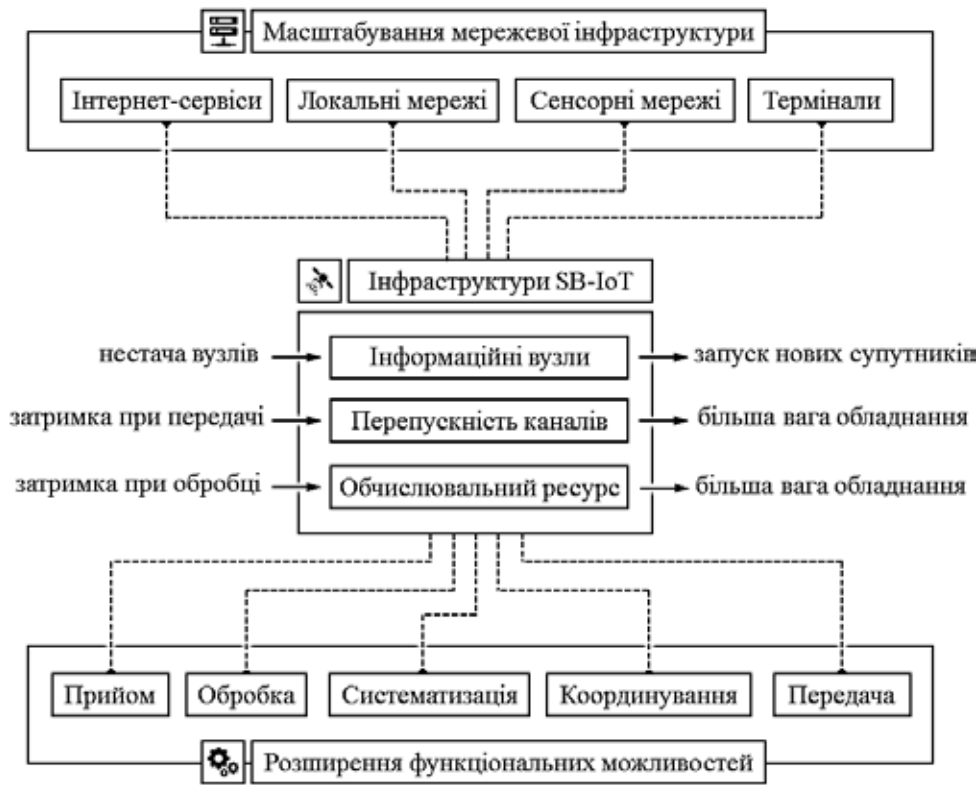


Рис. 1. Діаграма росту вимог до інфраструктури SB-IoT відповідно масштабування мережевих сервісів та розширення їх функціональних можливостей

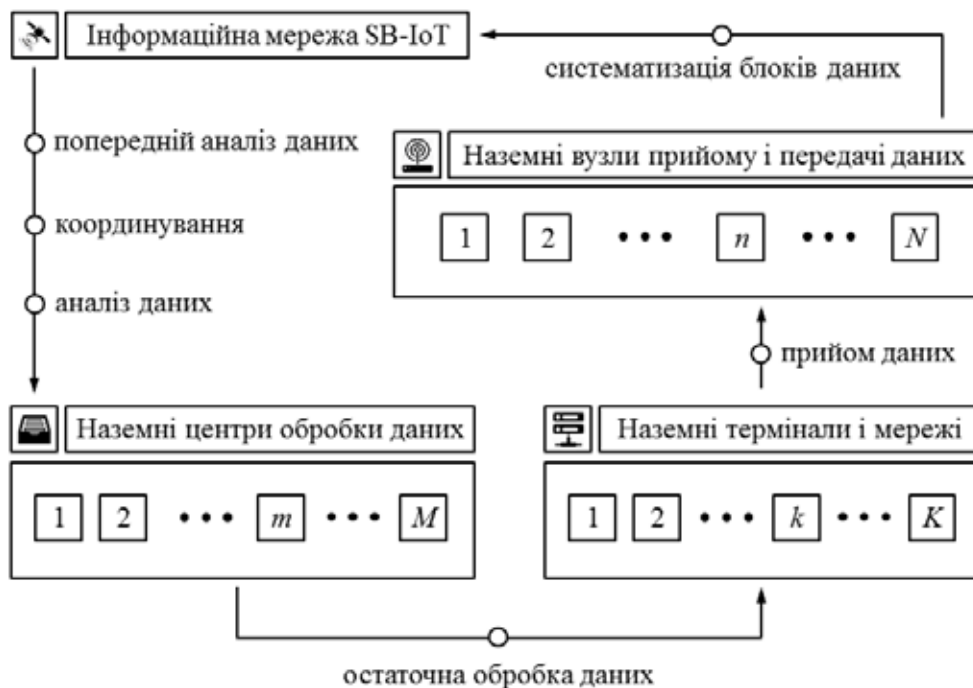


Рис. 2. Узагальнена схема організації інфраструктури SB-IoT наземними центрами обробки, прийому і передачі даних

передачі даних у середовищі супутникових мереж та розробка системи оцінки їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо математичну модель прийому і передачі даних

комплексом комунікаційних вузлів $n \in [1; N]$ наземної підсистеми SB-IoT, що відбувається протягом часового інтервалу $t \in [T_-; T_+]$. Дискретизуємо множину операцій прийому і передачі даних

через введення мінімального часового інтервалу T_0 . Таким чином, множина операцій прийому і передачі даних може бути виражена через одно-мірну матрицю \mathbf{T} , кожному елементу якої Δt_i відповідає матриця блоку даних, що передаються \mathbf{D}_i , як складник загального блоку матриці даних $\mathbf{D}:\{\mathbf{D}_i\}$, що передаються протягом повного часового інтервалу $[T_-; T_+]$. :

$$\mathbf{T}:\{\Delta t_i\}, \text{де} \begin{cases} i \in [1; I], \text{де } I = \frac{T_+ - T_-}{T_0} \\ \left[\begin{array}{l} \Delta t_i \in [T_-; T_+] \text{ для } \forall i \\ \Delta t_i = T_- + i \cdot T_0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (1)$$

Застосування алгоритмів відновлення дискретних даних (ВДА) у рамках розробки методик оптимізації роботи SB-ІоТ шляхом зніснення навантаження на інфраструктуру мережевих каналів включає у себе застосування процедури вибіркового збору даних на етапі підготовки даних наземними станціями та процедури реконструкції даних на етапі обробки даних на інформаційному вузлі супутникової мережі. Нехай кількість наземних вузлів, що приймають і передають дані протягом інтервалу Δt_i , складає $N_i \in [1; N]$, а об'єм даних, що підлягає відновленню для окремого вузла n , складає $D_{i,n}^\Delta$, тоді як загальний об'єм даних для цього вузла складає $D_{i,n}^\Sigma$. Відповідно, кожен наземний вузол n у часовий інтервал Δt_i передає об'єм даних $D_{i,n} = D_{i,n}^\Sigma - D_{i,n}^\Delta$.

Чисельні показники, що характеризуватимуть ефективність методу, що базується на ВДА-алгоритмах, можна виразити через цільові функції рівня стиснення даних відповідно зменшення кількості вузлів наземних станцій, що застосовуються під час передачі даних (показник η_N), та зменшення об'єму даних, що передаються (показник η_D):

$$\left[\begin{array}{l} \eta_N = \frac{N - N_i}{N} \cdot 100\% \text{ для } \begin{cases} N > 0 \\ N_i \in [1; N] \end{cases} \\ \eta_D = \left(1 - \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{D_{i,n}^\Sigma - D_{i,n}^\Delta}{D_{i,n}^\Sigma} \right) \right) \cdot 100\% \text{ для } D_{i,n}^\Sigma > 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Пошук глобальних максимумів $\max(\eta_N)$ і $\max(\eta_D)$ надає можливість на математичному рівні вирішити задачу оптимізації ВДА-алгоритму під час їх застосування у апаратно-програмному середовищі SB-ІоТ. На рис. 3 представлено загальну схему роботи інформаційного вузла

супутникової мережі SB-ІоТ, що працює на основі даних, які надходять від наземних інформаційних вузлів прийому і передачі даних.

Представлена схема функціонування інфраструктури SB-ІоТ, таким чином, включає у себе наступні етапи:

- отримання інформаційним вузлом супутникової мережі SB-ІоТ набору вхідних даних;
- проведення кластеризації і систематизації набору на основі вибірки з високим рівнем просторової кореляції, що сформована на попередніх етапах прийому-передачі даних від сенсорних мереж наземного комплексу SB-ІоТ;
- формування для кожного кластера нової вибірки відповідно поточного набору даних наземних вузлів сенсорної мережі;
- відновлення даних для кожного кластера на основі часової і просторової кореляції між компонентами отриманої вибірки відповідно оптимізованого ВДА-алгоритму;
- передача вибірки з відновленими даними у базу для застосування на наступних етапах кластеризації, отримання вибірки і відновлення даних на основі ВДА-алгоритму.

При цьому оптимізація схеми проводиться на рівні наземних станцій та аналізу математичної моделі, аби не збільшувати навантаження на обчислювальний ресурс інформаційних вузлів супутникової мережі.

Висновки. Таким чином, у результаті проведеного дослідження було розглянуто тенденції впровадження парадигми «Інтернету речей» та, зокрема, її реалізації на базі супутникової мережі. Показано, що актуальність супутникового «Інтернету речей» пов'язана з неможливістю рівномірного покриття поверхні планети наземними інформаційними вузлами, але, тим не менш, мережі супутникового «Інтернету речей» також мають частково базуватись на наземних станціях прийому, передачі і обробки даних. Для цього було узагальнено схему організації та оптимізації супутникових розподілених інформаційних систем та розроблено базову математичну модель інфраструктури наземних станцій. Була запропонована методика впровадження супутникової розподіленої інформаційної системи, програмна платформа якої базується на застосуванні алгоритмів відновлення масивів дискретних даних. Показано можливість відповідно до зазначеного підходу зменшити вимоги до показника перепускності інформаційного каналу шляхом обмеження інформаційного обсягу даних, які підлягають збору завдяки застосуванню процедури

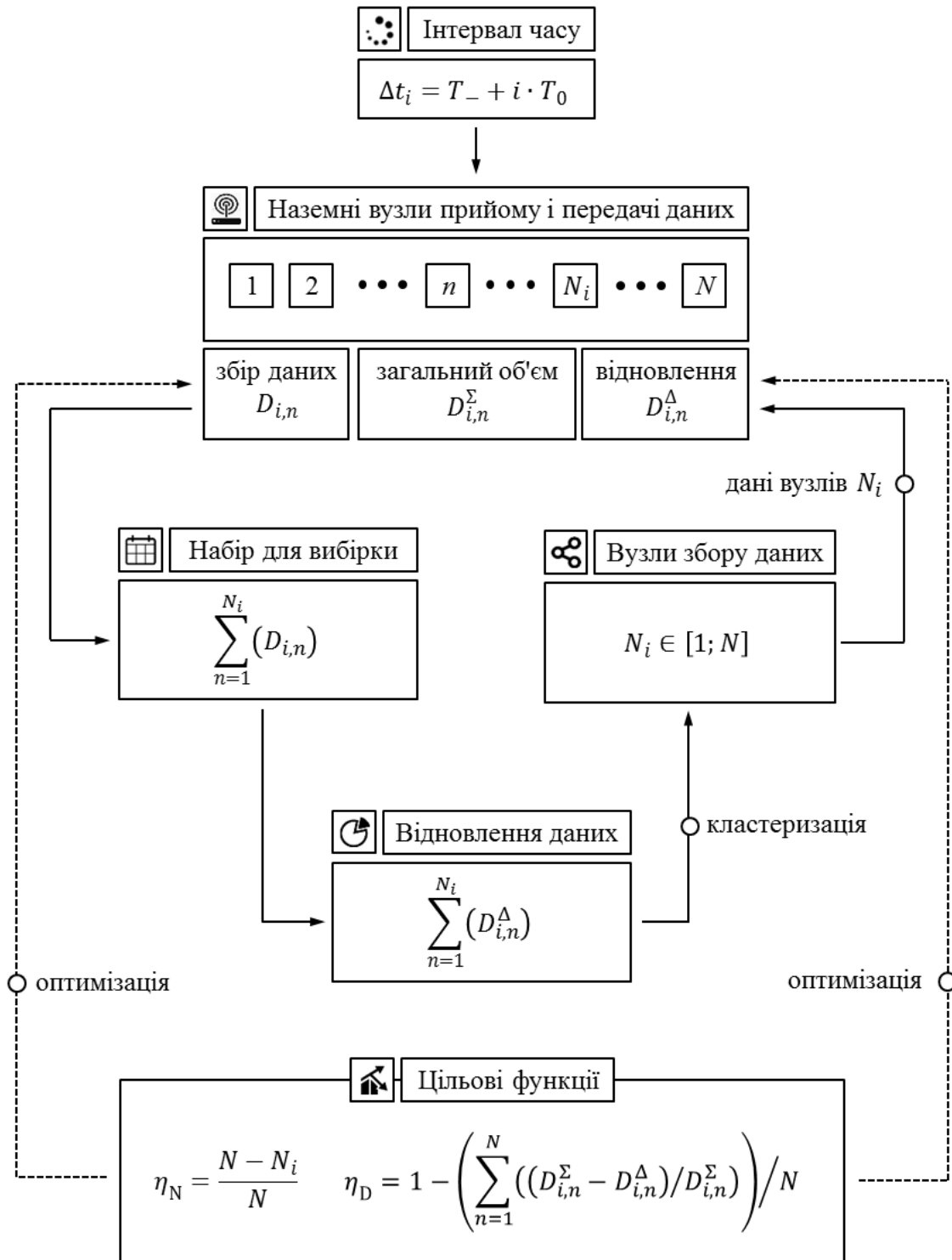


Рис. 3. Схема роботи та оптимізації інформаційного вузла SB IoT з наземними вузлами прийому та передачі даних

вибіркового збору і реконструкції частини елементів масиву даних. Запропонована в результаті дослідження архітектура апаратно-програмної платформи інформаційного вузла системи супутникового «Інтернету речей» складається з функціональних блоків кластеризації вхідних даних, отримання вибірки даних і відновлення даних.

Розроблена математична модель надає можливість проведення оптимізації і налаштування апаратно-програмної платформи SB-IoT через розрахунок цільових функцій рівня стиснення даних, шляхом зведення задачі оптимізації до математичної задачі пошуку максимумів відповідних цільових функцій.

Список літератури:

1. Wei J., Cao S. Application of Edge Intelligent Computing in Satellite Internet of Things. *IEEE International Conference on Smart Internet of Things (Smart IoT)*. 2019. P. 52–58.
2. Aiyetoro T., Owolawi A. Spectrum Management Schemes for Internet of Remote Things (IoRT) Devices in 5G Networks via GEO Satellite. *Future Internet*. 2014. No.11(12). P. 257–266.
3. Soua R., Palattella M.R., Engel T. IoT Application Protocols Optimization for Future Integrated M2M-Satellite Networks. 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), 2018. P. 22-32.
4. Gedik B., Liu L., Yu P.S. ASAP: an adaptive sampling approach to data collection in sensor networks. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2007. No. 18 (12). P. 1766–1783.
5. Nguyen M.T., Teague K.A. Compressive sensing based random walk routing in wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2017. No.54. P. 99–110.
6. Rajesh G., Chaturvedi A. Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks. *Computer Networks*. 2019. Vol. 164. P. 106902–106911.
7. Zhou X., Ling H. Zero-effort projection for sensory data reconstruction in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2016. No. 12 (8). P. 1550–1563.
8. Kong L., Xia M., Liu X.Y., Wu M.Y., Liu X. Data loss and reconstruction in sensor networks. *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. IEEE Press, Piscataway. 2013. P. 1654–1662.
9. Vijayaraghavan V., RianLeevinson J. Intelligent traffic management systems for next Generation IoV in smart City Scenario. *Connected Vehicles in the Internet of Things*. 2020. P. 123–141.
10. Sachdev R. Towards security and privacy for Edge AI in IoT/IOE based digital Marketing Environments. *2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*. 2020. P. 98–109.

Bunke O.S., Novikov P.V. METHOD OF OPTIMIZATION OF DATA COLLECTION ALGORITHMS FOR NETWORK NODES OF THE IOT SYSTEM

There were analyzed key factors that hinder the active implementation of the Internet of Things paradigm as a set of concepts for creating a single network structure consisting of electronic devices, which on the basis of standardized communication protocols automatically exchange data through coordination centers. Mentioned limitations are related to the impossibility of uniform coverage of the planet's surface by terrestrial nodes of information networks, which, in turn, indicates the priority of development of hardware and software systems within the infrastructure of the Space-based Internet of Things. The systematization of typical tasks typical for the construction of the hardware and software base of the satellite Internet of Things, in particular, current trends related to the development of data collection algorithms. The scheme of organization of satellite distributed information systems is generalized and the possibility of its optimization by introduction of terrestrial data processing centers is indicated. A basic mathematical model of the infrastructure of ground stations for data collection and processing has been developed, which operates within the framework of the Internet of Things concept. The proposed technique includes the introduction of a satellite distributed information system, the software platform of which is based on the application of algorithms of sampling-reconstruction, as well as methods of spatio-temporal compressive sensing. At the level of mathematical modeling, it is possible to reduce the bandwidth requirements of the information channel by limiting the information volume of data to be collected by applying the procedure of selective collection and reconstruction of some elements of the data array. The proposed architecture of the hardware-software platform of the information node of the Space-based Internet of Things, thus, consists of functional blocks of clustering of input data, obtaining a basic data sample and data recovery. The improvement of the mathematical model includes the use of objective data compression indicators as objective functions, which allows to reduce the optimization problem to the mathematical problem of finding the extrema of the objective functions.

Key words: Space-based Internet of Things, distributed information system, information channel capacity, sampling-reconstruction, data clustering, spatio-temporal compressive sensing, target function.