

АНОТАЦІЯ

Петрівський В. Я. Моделі та методи програмованої оптимізації структури сенсорних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» (12 – Інформаційні технології). – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2022.

У сучасному технологічному світі сенсори та сенсорні мережі широко використовуються у багатьох сферах людської діяльності. Популярність даних систем зумовлена широким спектром переваг: невеликий розмір, невеликі енерговитрати, різноманітність величин виміру, тощо. Проте при використанні сенсорів та сенсорних мереж виникають проблеми енергоефективності та вартості мережі при максимізації покриття, побудова оптимальних маршрутів при обльоті території, живучість сенсорних мереж.

У дисертаційній роботі представлено розроблені методи та алгоритми, що дозволяють знаходити параметри датчиків (радіус покриття, величина перетину зон покриття) за яких досягається максимальне покриття території при мінімальних енерговитратах та вартості мережі, будувати оптимальні траєкторії обльоту території, оцінювати живучість мережі з знаходженням вразливих елементів мережі. Під програмованою оптимізацією розуміємо можливість зміни характеристик мережі (радіус покриття датчиків, діаметр перетину зон покриття, топологія) під час функціонування мережі для досягнення оптимальності за певними критеріями (енергоефективність, покриття, вартість мережі). Тобто, на етапі проектування програмного забезпечення ми закладаємо можливість масштабування користувачем структури та характеристик сенсорної мережі, оцінки живучості та виявлення вразливих елементів мережі на етапі експлуатації.

Перший розділ дисертації присвячено огляду сучасного стану питань покриття території, оптимізації енерговитрат, моделювання руху датчиків, оцінці живучості сенсорних мереж. Проведено аналіз останніх наукових досліджень

стосовно даних питань та виявлено фактори, які не враховувалися у даних дослідженнях. Наведено математичну постановку задачі у загальному вигляді.

У другому розділі представлено методи знаходження оптимальних параметрів сенсорів (радіус покриття, діаметр перетину зон покриття) за яких досягається максимізація покриття території при мінімізації енерговитрат, вартості мережі та кількості використаних датчиків. Пошук оптимальних параметрів мережі сформульовано у вигляді оптимізаційних задач та доведено існування розв'язків даних задач. Також у другому розділі представлено методи побудови траєкторій обльоту території з врахуванням критеріїв максимізації покриття, мінімізації енерговитрат, максимізації можливої цінності виявлених об'єктів вздовж траєкторії.

Методи оцінки живучості сенсорних мереж та виявлення вразливих елементів сенсорних мереж представлено у третьому розділі. Враховано пропускну спроможність елементів мережі. Також представлено алгоритм забезпечення живучості сенсорних мереж, що складаються як з динамічних так і з статичних датчиків та їхньої комбінації.

У четвертому розділі представлено метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж та описано розроблене програмне забезпечення у якому реалізовано розроблений метод. Архітектуру та варіанти використання розробленого програмного комплексу описано з використанням UML діаграм. Наведено приклади використання розроблених методів на конкретних сенсорних мережах та конкретних територіях. Аналіз отриманих результатів підтвердив ефективність розроблених та представлених у дисертаційній роботі методів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод програмованої оптимізації структури сенсорних мереж, що дозволяє модифікувати мережу під час промислової експлуатації на основі принципів об'єктно-орієнтованого програмування;

2. Вперше запропоновано методи оптимізації покриття території сенсорною мережею за критеріями максимізації покриття, мінімізації енерговитрат та вартості мережі з використанням статичних та динамічних датчиків. На відміну

від існуючих підходів дані критерії враховуються одночасно, завдяки чому збільшується енергоефективність та рентабельність мережі;

3. Вперше запропоновано метод виявлення вразливих елементів сенсорної мережі та забезпечення живучості мережі за рахунок комбінацій статичних та динамічних датчиків. На відміну від існуючих підходів враховано пропускну спроможність елементів мережі, що підвищує точність оцінки живучості сенсорної мережі завдяки виявленню додаткових вразливих елементів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено кросплатформну динамічно приєднувану бібліотеку, що забезпечує інструментарій максимізації покриття території датчиками з мінімальними енерговитратами та вартістю мережі, побудови оптимальних траєкторій руху датчиків, оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж використання якого не залежить від цільової платформи користувача;

2. Створено програмний комплекс, який дозволяє будувати енергоефективні та рентабельні сенсорні мережі при максимізації покриття території статичними та динамічними датчиками. У програмному забезпеченні також реалізовано можливість оцінки та забезпечення живучості сенсорних мереж. Програмний продукт дозволяє наочне відображення вхідних даних та результатів за рахунок широкого спектру засобів візуалізації та може використовуватися для розв'язання широкого кола задач, пов'язаних з використанням сенсорних мереж;

3. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Додаток Г).

Ключові слова: програмована оптимізація, динамічно приєднана бібліотека, програмний комплекс, енергоефективність сенсорних мереж, максимізація покриття території, мінімізація вартості сенсорних мереж, оптимальна траєкторія руху датчиків, живучість сенсорних мереж.

SUMMARY

Petrivskiy V. Models and methods of programmable optimization of the structure of sensor networks. - Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 12 Information technologies in a specialty 121 Software engineering. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2022.

In today's technological world, sensors and sensor networks are widely used in many areas of human activity. The popularity of these systems is due to a wide range of advantages: small size, low energy consumption, variety of measurements, etc. However, when using sensors and sensor networks, there are problems with energy efficiency and cost of the network when maximizing coverage, building optimal routes when flying around the territory, and survivability of sensor networks.

The dissertation presents the developed methods and algorithms that allow to find sensor parameters (radius of coverage, size of intersection of coverage zones) that achieve maximum coverage of the territory with minimal energy consumption and network cost, build optimal trajectories of the territory, evaluate the survivability of the network with the detection of vulnerable network elements. By programmable optimization, we understand the possibility of changing network characteristics (radius of sensor coverage, cross-sectional diameter of coverage zones, topology) during network operation to achieve optimality according to certain criteria (energy efficiency, coverage, network cost). That is, at the stage of software design, we provide the possibility for the user to scale the structure and characteristics of the sensor network, assess survivability and identify vulnerable network elements at the stage of operation.

The first chapter of the dissertation is dedicated to the review of the current state of issues of territory coverage, optimization of energy consumption, modelling of sensor movement, and assessment of survivability of sensor networks. An analysis of the latest scientific research on these issues was carried out and factors that were not taken into account in these studies were identified. The general mathematical formulation of the problem is presented.

The second chapter presents the methods of finding optimal sensor parameters (radius of coverage, level of intersection of coverage zones), which maximize coverage

of the territory while minimizing energy consumption, network costs, and the number of sensors used. The search for optimal network parameters is formulated in the form of optimization problems, and the existence of solutions to these problems is proved. Also, the second chapter presents the methods of building flight trajectories of the territory taking into account the criteria of maximization of coverage, minimization of energy consumption, and maximization of the probable value of detected objects along the trajectory.

Methods for assessing the survivability of sensor networks and identifying vulnerable elements of sensor networks are presented in the third section. The bandwidth of network elements is taken into account. An algorithm for ensuring the survivability of sensor networks consisting of both dynamic and static sensors and their combination is also presented.

In the fourth chapter the method of programmed optimization of the structure of sensor networks and the developed software in which the presented method is implemented are presented. The functionality and architecture of the developed software complex is described using UML diagrams. Examples of the use of the developed methods on specific sensor networks and specific territories are given. The analysis of the obtained results confirmed the effectiveness of the methods developed and presented in the dissertation.

The scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time, a method of programmed optimization of the structure of sensor networks is proposed, which allows modifying the network during industrial operation based on the principles of object-oriented programming;
2. For the first time, the methods of optimizing the coverage of the territory by the sensor network were proposed according to the criteria of maximizing the coverage, minimizing the energy consumption, and the cost of the network using static and dynamic sensors. Unlike existing approaches, these criteria are taken into account simultaneously, which increases the energy efficiency and profitability of the network;
3. For the first time, a method of detecting vulnerable elements of a sensor network and ensuring the survivability of the network due to combinations of static and

dynamic sensors is proposed. In contrast to existing approaches, the bandwidth of network elements is taken into account, which increases the accuracy of assessing the survivability of the sensor network due to the detection of additional vulnerable elements.

The practical significance of the obtained results:

1. A cross-platform dynamically connected library has been developed, which provides a toolkit for maximizing the coverage of the territory by sensors with minimal energy consumption and network cost, building optimal trajectories of sensor movement, assessing and ensuring the survivability of sensor networks, the use of which does not depend on the user's target platform;

2. A software complex has been created that allows for building energy-efficient and cost-effective sensor networks while maximizing the coverage of the territory with static and dynamic sensors. The functionality of assessing and ensuring the survivability of sensor networks is also implemented in the software. The software product allows visual display of input data and results through a wide range of visualization tools and can be used to solve a wide range of problems related to the use of sensor networks;

3. The results of the dissertation research were implemented in the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Appendix D).

Keywords: programmable optimization, dynamic link library, software complex, energy efficiency of sensor networks, maximization of territory coverage, minimization of cost of sensor networks, optimal trajectory of sensor movement, survivability of sensor networks.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України:

(які входять до переліку МОН України)

1. Development of a modification of the method for constructing energy-efficient sensor networks using static and dynamic sensors / V. Petrivskyi et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2022. Vol. 1, no. 9(115). P. 15–23. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988> (Scopus, Категорія «А»).
2. Information technology to ensure the survivability of sensor networks / V. Y. Petrivskyi et al. *Problems in programming*. 2021. No. 4. P. 062–069. ISSN 1727-4907. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2021.04.062>.
3. Петрівський В., Шевченко В., Бражиненко М. Збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат. *Системи обробки інформації*. 2019. № 3(158). С. 36–41. ISSN 1681-7710. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.158.04>.

Статті в іноземних виданнях:

(статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (крім видань держави, визнаної Верховною Радою України державою-агресором))

4. Petrivskyi V., Bychkov O., Martsenyuk V. Proving the existence of solutions to the problems of minimizing the energy consumption of sensor networks. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 7687. URL: <https://doi.org/10.3390/app12157687> (Scopus, Q2).
5. A method for maximum coverage of the territory by sensors with minimization of cost and assessment of survivability / V. Petrivskyi et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12, no. 6. P. 3059. URL: <https://doi.org/10.3390/app12063059> (Scopus, Q2).
6. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Mathematical modeling and*

simulation of systems. MODS 2021. Lecture notes in networks and systems. 2022. Vol. 344. P. 17–30 (Scopus).

7. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal*. 2020. Vol. 47, no. 1. P. 141–154. URL: <https://doi.org/10.11610/isij.4710>.

Одноосібний розділ у монографії:

8. Петрівський В. Збільшення часу роботи датчиків небезпечних ситуацій шляхом регулювання енерговитрат. *Прикладні програмні технології ІоЕ, як фундамент BigData: монографія* / ред. В. Шевченко. Київ, 2021. С. 172–176.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Оптимізація траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території моніторингу та ймовірності виявлення об'єктів / В. Петрівський та ін. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 6–22. URL: <http://doi.org/10.34229/2786-6505-2022-2-1> (Категорія «А»).

10. Інформаційна технологія покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат / В. Петрівський та ін. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. № 68. С. 65–72. ISSN 2524-0056. URL: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-07>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. The concept of systems survivability in the Internet of Everything case / V. Petrivskyi et al. *MSTIoE 2021-8. 8-ма Східно-Европейська конференція “Математичні та програмні технології Internet of Everything”*, Київ, 2021. P. 16–18.

12. Petrivskyi V., Shevchenko V., Vyckov O. Mathematical modeling of random motion of IoE sensors based on rectilinear motion. *MSTIoE 2020-1 6-th East*

European Conference on Mathematical Foundations and Software Technology of Internet of Everything, Київ, 2020. P. 93.

13. Information technology for determining the optimal sensor trajectory in already covered area case / V. Petrivskyi et al. *MITAV 2020. The international conference of mathematics, information technologies and applied sciences*, Brno, 17–18 June 2020. Brno, 2020, ISBN 978-80-7582-307-6.

14. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization / V. Petrivskyi et al. *Математичне та імітаційне моделювання систем: МОДС 2021: тези доповідей Шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції*, Чернігів, 28 June – 1 July 2021. Чернігів, 2021. P. 30–33.

15. CAD technology for optimal territory covering / V. Petrivskyi et al. *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm52681.2021.9385223>. (Scopus)

16. Огляд поняття живучості систему контексті концепції Інтернету всього / В. Петрівський та ін. *Інформаційні технології –2021 : зб. тез VIII Всеукр. науково-практ. конф. молодих науковців, м. Київ, 20 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 133–134.*

17. Petrivskyi V., Pyzh O. A smart dust technology structure and applications overview. *Information Technology and Interactions (Satellite) : Conference Proceedings*, Kyiv, 2 December 2021 / ed. by V. Snytyuk. Kyiv, 2021. P. 120–122.

18. Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation / V. Petrivskyi et al. *Information & Security: An International Journal* 47, Varna, 30 September – 2 October 2020. Varna, 2020. P. 141–154.

19. Information Technology of the Increasing Sensors Term of Use Considering Their Movement / V. Petrivskyi et al. *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, Ukraine, 22–26 April 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/memstech49584.2020.9109431>. (Scopus)

20. Петрівський В., Шевченко В. Переваги використання мобільних мереж п'ятого покоління у концепції інтернету речей. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Застосування програмного забезпечення в інфокомунікаційних технологіях»*. Збірник тез, м. Київ, 9 лют. 2020 р. Київ, 2020. С. 38.

21. Estimation of Noise Hazards in Environmental Monitoring Tools Designe in the Subway / V. Petrivskyi et al. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 26 February – 2 March 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm.2019.8779315>. (Scopus).