

АНОТАЦІЯ

Березівський М.Ю. Моделі і методи підвищення ефективності передачі трафіку в мережах VANET. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка». – Державний університет телекомунікацій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності передачі трафіку в мережах автомобільного транспорту (VANET). В основу дисертаційної роботи закладені дослідження, присвячені методам організації процесу маршрутизації в мережах VANET. Процес маршрутизації є базовим для автомобільних мереж і вимагає найбільш детального аналізу і опрацювання в розрізі виконання ключових задач інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

Зростання міст, викликане урбанізацією населення, веде не тільки до збільшення площ і висотності забудови, але і супутнього розширення дорожньої мережі. У сукупності з підвищенням цінової доступності автомобілів дана тенденція неодмінно призводить до загострення проблем, пов'язаних зі збільшенням щільності та інтенсивності транспортних потоків. Так, в останнє десятиліття не тільки за кордоном, але і в Україні спостерігається бурхливий ріст автомобільного парку. У свою чергу це призводить до зниження рівня безпеки дорожнього руху і, як наслідок, до зростання числа дорожньо-транспортних пригод. З урахуванням якості дорожнього покриття і досить частих поганих умов видимості, подібні події все частіше стають масовими. Аналізуючи причини подібних тенденцій, не важко зрозуміти, що аварійні ситуації відбуваються з причини неможливості завчасного інформування водіїв про небезпеку. Цей факт привів наукове

співтовариство до закономірного висновку про необхідність залучення сфери інформаційних технологій на допомогу автолюбителям.

На початку XXI століття, в рамках концепції Інтернету Речей (IoT) зародився новий напрямок розвитку, метою якого стало створення інфокомунікаційної структури, яка дозволила б забезпечити учасників дорожнього руху не тільки інформацією, пов'язаною з безпекою, але і додатковими видами інформаційних послуг. Даний напрямок отримало назву Інтелектуальні Транспортні Системи (ІТС). Одним з найважливіших компонентів ІТС, які відповідають за формування мережевої структури, є автомобільні мережі VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), для побудови яких був розроблений спеціальний стандарт IEEE 802.11p.

Специфіка даного класу мереж, обумовлена високою динамікою зміни їх складу і структури, привела до формування широкого спектру науково-дослідних завдань.

В умовах високих вимог до затримок, які не повинні перевищувати 10 мс, для основних груп повідомлень від додатків, пов'язаних з безпекою дорожнього руху, ключовим завданням більшості досліджень стала оптимізація використання мережевого ресурсу. Виникаючі при цьому складності, викликані комплексом факторів, що впливають, пов'язаних зі структурою оточення, в межах якого розгортається система. Особливо яскраво дані фактори проявляються в умовах міського середовища з висотною забудовою і інтенсивними транспортними потоками. Незважаючи на наявність цілого ряду наукових досліджень в даній області, завдання розробки оптимізованих методів інформаційного обміну залишається актуальним.

Поряд з більш звичною архітектурою комунікацій, коли мобільні вузли взаємодіють зі стаціонарною інфраструктурою, відмінною рисою мереж VANET є можливість формування тимчасової мережі. Подібний підхід до реалізації систем має як ряд переваг, до яких відносяться економічні

показники, швидкість і простота впровадження послуг, так і недоліків, пов'язаних зі складністю виконання вимог до надійності доставки і затримок.

Недоліком проведених на сьогоднішній день досліджень є відсутність методів оцінки та порівняння протоколів маршрутизації для мереж, що розглядаються. Прийнята в даний час класифікація протоколів не дозволяє оцінити доцільність застосування конкретних рішень в тому чи іншому випадку. Таким чином, є необхідність створення методу оцінки і порівняння існуючих і розроблюваних протоколів маршрутизації для мереж VANET.

З урахуванням вищеприписаного, очевидно, що область організації інформаційного обміну в мережах VANET, вимагає проведення додаткових досліджень, а тема дисертації є актуальною.

Метою даної роботи є підвищення ефективності передачі даних в мережах VANET. Для досягнення мети розроблено метод оцінки якості передачі даних, що включає в себе критерії оцінки якості, математичні моделі мереж VANET, програмну реалізацію імітаційної моделі мережі, що дозволяє отримати значення параметрів якості мережі, а також методики оцінки і порівняння протоколів, що забезпечує вибір оптимального протоколу маршрутизації для мереж VANET.

В рамках дисертаційної роботи вирішувалися такі основні завдання:

- розробка комплексних критеріїв якості передачі даних для спеціалізованих бездротових мереж відповідно до класів їх цільового використання;
- розробка імітаційної моделі спеціалізованих бездротових мереж, яка включає в себе математичні моделі топології, моделі бездротових каналів зв'язку, моделі мережевого навантаження і алгоритмів, що управляють кінцевим пристроєм;
- реалізація розробленої імітаційної моделі з використанням інструментальних засобів моделювання мереж;
- розробка методики вибору і оцінки алгоритмів маршрутизації для спеціалізованих мереж VANET;

- розробка протоколу маршрутизації адаптованого для мереж VANET;
- оцінка ефективності розробленого протоколу маршрутизації для мереж VANET.

Для досягнення мети було вирішено наступні наукові задачі:

1. Вперше розроблено критерії комплексної оцінки якості спеціалізованих бездротових мереж, які орієнтовані на практичні завдання, які вирішуються з використанням мереж VANET. Розроблені критерії дозволяють, використовуючи інтегральні оцінки ефективності, проводити порівняння спеціалізованих бездротових мереж, призначених для вирішення цільових завдань різного класу.

2. Розроблена методика оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для бездротових мереж автомобільного транспорту. Застосування цієї методики дозволило підвищити ефективність протоколів маршрутизації.

3. Вперше запропонований спеціалізований протокол маршрутизації для бездротових мереж автомобільного транспорту, який дозволяє збільшити ефективність роботи мережі для деяких випадків (дорожніх ситуацій) більш ніж на 46%.

4. Набуло подальшого розвитку імітаційне моделювання спеціалізованих бездротових мереж. Розроблено об'єктно-орієнтована потокова імітаційна модель спеціалізованої бездротової мережі автомобільного транспорту. Основною відмінністю моделі є використання об'єктно-орієнтованого підходу для подання окремих компонентів мережі і зв'язків між цими компонентами. Даний підхід забезпечує архітектурну і функціональну відповідність моделі фізичної системи, простоту впровадження нових і заміни існуючих класів об'єктів без зміни концептуальної структури моделі, можливість налаштування параметрів і вихідних даних моделі під завдання дослідження.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному, а саме:

1. Розроблена програмна реалізація імітаційної моделі спеціалізованої бездротової мережі, програмно реалізовані критерії оцінки якості передачі даних в бездротових мережах VANET.

2. Запропоновано протокол маршрутизації, призначений для мереж автомобільного транспорту. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили підвищення ефективності передачі даних в мережах VANET при використанні запропонованого протоколу.

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів в яких логічно, на високому науково-технічному рівні викладено рішення поставленої задачі дослідження.

У першому розділі проводиться огляд сучасної концепції розвитку інтелектуальних транспортних систем. Для цього виконується детальний аналіз стандартизації даної області на міжнародній арені. Також наводяться приклади найбільших проектів, які реалізують ідеологію ІТС.

Проведено аналіз і описані стандарти та протоколи фізичного і канального рівнів для бездротових мереж VANET. Розглянуто поширені алгоритми, що визначають поведінку розглянутих VANET мереж. Наведено класифікацію сучасних протоколів маршрутизації для бездротових мереж VANET, проведено аналіз їх продуктивності.

В кінці першого розділу сформульовані основні проблеми, пов'язані з побудовою та функціонуванням спеціалізованих мереж VANET. На основі проведеного аналізу, пропонується підхід до дослідження мереж даного класу.

У другому розділі розроблені математичні моделі для спеціалізованих бездротових мереж VANET, а також проведено аналіз основних параметрів мереж даного класу, що впливають на її поведінку та продуктивність. Запропоновані моделі мережевого навантаження дозволяють моделювати трафік мереж VANET. Для моделювання трафіку загального призначення розглянуті стандартні моделі мережевого навантаження.

У третьому розділі розроблені комплексні критерії оцінки якості передачі даних в мережах VANET. Також розроблено спеціалізований протокол маршрутизації FSRM. Для оцінки якості протоколів маршрутизації, що працюють в мережах VANET розроблена методика оцінки та порівняння їх якості.

У четвертому розділі реалізована імітаційна модель мережі VANET. Розглянуті існуючі системи імітаційного моделювання, їх переваги і недоліки. За допомогою реалізованої імітаційної моделі отримані чисельні показники якості передачі даних для мереж, що використовують різні протоколи маршрутизації. Експериментально доведено ефективність розробленого протоколу FSRM. Даний протокол дозволяє підвищити ефективність роботи мережі для деяких випадків (дорожніх ситуацій) більш ніж на 46%.

Дисертація виконувалась в Державному університеті телекомунікацій. Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій. Результати дисертаційної роботи знайшли застосування в науково-дослідних роботах, а саме: 2017-2021 рр.- “Дослідження надійності телекомунікаційних мереж” (ПК № 0114U000404), “Методика розробки безпроводової мережі високої щільності на базі технології Aruba Instans” (ПК № 0118U004553), “Методика підвищення ефективності систем управління безпроводовими мережами на основі векторного синтезу” (ПК № 0118U004552). Результати дисертаційної роботи також використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій (при дипломному (курсовому) проектуванні та при викладанні навчальних дисциплін: «Телекомунікаційні системи передачі», «Проектування телекомунікаційних систем та мереж», «Побудова SDN-мереж», «Машинне навчання та обробка даних в IoT».

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, ІТС, мережі автомобільного транспорту, VANET.

ANNOTATION

Berezivskiy M. Models and methods to increase the efficiency of traffic transmission in VANET networks. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 - "Telecommunications and Radio Engineering". - State University of Telecommunications of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work is devoted to increase of efficiency of traffic transfer in networks of motor transport (VANET). The dissertation is based on research on methods of organizing the routing process in VANET networks. The process of routing is basic for road networks and requires the most detailed analysis and processing in terms of key tasks of intelligent transport systems (ITS).

Urban growth caused by urbanization of the population leads not only to an increase in the area and height of buildings, but also a concomitant expansion of the road network. In combination with the increase in the affordability of cars, this trend inevitably leads to an exacerbation of the problems associated with increasing the density and intensity of traffic flows. Thus, in the last decade, not only abroad but also in Ukraine, there has been a rapid growth of the car fleet. In turn, this leads to a decrease in road safety and, as a consequence, to an increase in the number of road accidents. Given the quality of the road surface and the frequent poor visibility conditions, such events are increasingly becoming widespread. Analyzing the reasons for such trends, it is not difficult to understand that accidents occur due to the impossibility of informing drivers about the danger in advance. This fact has led the scientific community to a natural conclusion about the need to involve the field of information technology to help motorists.

At the beginning of the XXI century, within the concept of the Internet of Things (IoT) a new direction of development was born, the aim of which was to create an infocommunication structure that would provide road users not only with safety information but also with additional information services. This area is called Intelligent Transport Systems (ITS). One of the most important components of ITS, which are responsible for the formation of the network structure, are automotive networks VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), for the construction of which a special standard IEEE 802.11p was developed.

The specificity of this class of networks, due to the high dynamics of changes in their composition and structure, has led to the formation of a wide range of research tasks.

Given the high requirements for delays, which should not exceed 10 ms, for the main groups of messages from applications related to road safety, the key task of most studies has been to optimize the use of network resources. The resulting difficulties are caused by a set of influencing factors associated with the structure of the environment within which the system is deployed. These factors are especially pronounced in an urban environment with high-rise buildings and heavy traffic. Despite the presence of a number of scientific studies in this field, the task of developing optimized methods of information exchange remains relevant.

Along with the more familiar communication architecture, when mobile nodes interact with a fixed infrastructure, a distinctive feature of VANET networks is the ability to form a temporary network. This approach to the implementation of systems has a number of advantages, which include economic performance, speed and ease of implementation of services, and disadvantages associated with the complexity of meeting the requirements for reliable delivery and delays.

The disadvantage of the research conducted to date is the lack of methods for evaluating and comparing routing protocols for the networks under consideration. The currently accepted classification of protocols does not allow to assess the feasibility of specific solutions in a given case. Thus, there is a need to

create a method for evaluating and comparing existing and being developed routing protocols for VANET networks.

Given the above, it is obvious that the field of organization of information exchange in VANET networks requires additional research, and the topic of the dissertation is relevant.

The purpose of this work is to increase the efficiency of data transmission in VANET networks. To achieve this goal, a method for evaluating the quality of data transmission has been developed, which includes quality evaluation criteria, mathematical models of VANET networks, software implementation of a network simulation model to obtain values of network quality parameters, and methods for evaluating and comparing protocols. routing for VANET networks.

Within the framework of the dissertation the following main tasks were solved:

- development of comprehensive quality criteria for data transmission for specialized wireless networks in accordance with the classes of their intended use;
- development of a simulation model of specialized wireless networks, which includes mathematical models of topology, models of wireless communication channels, models of network load and algorithms that control the end device;
- implementation of the developed simulation model with the use of network modeling tools;
- development of a methodology for selecting and evaluating routing algorithms for specialized VANET networks;
- development of a routing protocol adapted for VANET networks;
- evaluation of the effectiveness of the developed routing protocol for VANET networks.

To achieve this goal, the following scientific problems were solved:

1. For the first time, criteria for comprehensive quality assessment of specialized wireless networks have been developed, which are focused on practical tasks that are solved using VANET networks. The developed criteria allow, using

integrated performance evaluations, to compare specialized wireless networks designed to address the objectives of different classes.

2. The technique of estimation and comparison of routing protocols for wireless networks of motor transport is developed. The application of this technique has increased the efficiency of routing protocols.

3. For the first time, a specialized routing protocol has been proposed for wireless road transport networks, which allows to increase the efficiency of the network for some cases (traffic situations) by more than 46%.

4. Simulation modeling of specialized wireless networks has been further developed. An object-oriented streaming simulation model of a specialized wireless road transport network has been developed. The main difference of the model is the use of object-oriented approach to represent the individual components of the network and the relationships between these components. This approach provides architectural and functional compliance of the physical system model, ease of implementation of new and replacement of existing classes of objects without changing the conceptual structure of the model, the ability to adjust the parameters and output data of the model for research.

The practical significance of the obtained results is as follows, namely:

1. Developed software implementation of a simulation model of a specialized wireless network, software implemented criteria for evaluating the quality of data transmission in VANET wireless networks.

2. The routing protocol intended for road transport networks is offered. Experimental studies have been carried out, which confirmed the increase of data transmission efficiency in VANET networks using the proposed protocol.

The dissertation consists of four sections in which the solution of the set research task is logically, at a high scientific and technical level.

The first section provides an overview of the modern concept of development of intelligent transport systems. To do this, a detailed analysis of the standardization of this area in the international arena. There are also examples of the largest projects that implement the ideology of ITS.

The analysis and described standards and protocols of physical and channel levels for VANET wireless networks are carried out. Common algorithms that determine the behavior of the considered VANET networks are considered. The classification of modern routing protocols for VANET wireless networks is given, their performance is analyzed.

At the end of the first section, the main problems related to the construction and operation of specialized VANET networks are formulated. Based on the analysis, an approach to the study of networks of this class is proposed.

The second section develops mathematical models for specialized wireless networks VANET, as well as an analysis of the main parameters of networks of this class that affect its behavior and performance. The proposed models of network load allow to simulate the traffic of VANET networks. Standard models of network load are considered for modeling of general-purpose traffic.

The third section develops comprehensive criteria for assessing the quality of data transmission in VANET networks. A specialized FSRM routing protocol has also been developed. To assess the quality of routing protocols operating in VANET networks, a method for assessing and comparing their quality has been developed.

In the fourth section, a simulation model of the VANET network is implemented. The existing systems of simulation modeling, their advantages and disadvantages are considered. With the help of the implemented simulation model, numerical indicators of data transmission quality for networks using different routing protocols are obtained. The effectiveness of the developed FSRM protocol has been experimentally proven. This protocol allows you to increase the efficiency of the network for some cases (traffic situations) by more than 46%.

The dissertation was performed at the State University of Telecommunications. The chosen field of research corresponds to the research topics of the State University of Telecommunications. The results of the dissertation were used in research, namely: 2017-2021 - "Study of the reliability of telecommunications networks" (RK № 0114U000404), "Methods of developing a

high-density wireless network based on Aruba Instans technology" (RK № 0118U004553), "Methods for increasing the efficiency of wireless network management systems based on vector synthesis" (RK № 0118U004552). The results of the dissertation are also used in the educational process of the State University of Telecommunications (in diploma (course) design and in teaching disciplines: "Telecommunication transmission systems", "Design of telecommunication systems and networks", "Construction of SDN-networks", "Machine learning and data processing in IoT").

Keywords: intelligent transport systems, ITC, road transport networks, VANET.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до
Організації економічного співробітництва та розвитку*

1. Berezivskiy M. Evaluation of information systems reliability indicators with limited a priori information / M. Berezivskiy, V. Vyshnivskiy, Yu. Kargapolov, Yu. Berezovska, R. Kosminskiy // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic).- 2021. VOL 1, No 63, p.8-14.

2. Berezivskiy M.Y. Mathematical modeling of VANET network topologies / M.Y. Berezivskiy, V. Vyshnivskiy, O. Zinchenko, Yu. Berezovska Yu. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2021. VOL 1, No 59 (59), p. 26-29.

*Статті у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого
ДАК України*

3. Березівський М.Ю. Дослідження показників ефективності мереж автомобільного транспорту / М.Ю. Березівський, О.В. Зінченко, О.С. Звенігородський, С.Ю. Резник, Є.В. Іваніченко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2020. - №4 (69). – С. 79-86.

4. Березівський М.Ю. Методика порівняння та оцінювання протоколів маршрутизації мереж автомобільного транспорту / О.В. Зінченко, О.С. Звенігородський, М.Ю. Березівський, М.М. Рижак // Зв'язок. - 2020. - №6 (148) – С. 58-60.

Матеріали й тези доповідей на конференціях

5. Березівський М.Ю. Методика порівняння і оцінки протоколів маршрутизації мереж автомобільного транспорту/ М.Ю. Березівський, О.В. Зінченко // «Інфраструктура ІКТ як основа створення цифрової економіки». Тези доповідей семінару-практикуму Міжнародного Союзу Електрозв'язку для країн Європи і СНГ 14-16 травня 2019 року / м. Київ. - С.66.

6. Березівський М.Ю. Математичне моделювання мереж Автомобільного транспорту / М.Ю. Березівський, О.В. Зінченко // «Сучасні досягнення компанії Hewlett Packard Enterprise в галузі ІТ та нові можливості їх вивчення і застосування». Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції 16 грудня 2020 року / м. Київ. - С.16.