

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Кваліфікаційна наукова праця

На правах рукопису

БЕРЕЗІВСЬКИЙ МАКСИМ ЮРІЙОВИЧ

УДК 681.3 621. 391

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПЕРЕДАЧІ ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ VANET**

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.Ю. Березівський

(підпис)

Науковий керівник: **ВИШНІВСЬКИЙ Віктор Вікторович**, доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

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 площі 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 (ІоТ) 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 802.11р.

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 розроблених 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 (курсному) 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, ITS, 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНЦЕПЦІЙ РОЗВИТКУ	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ.....	25
1.1 Цілі і завдання Інтелектуальних Транспортних систем.....	25
1.2 Зарубіжні проекти в області ІТС.....	27
1.3 Стандарти в області ІТС.....	29
1.4 Архітектура ІТС.....	36
1.5 Автомобільні мережі в структурі ІТС.....	42
1.6 Додатки автомобільних мереж.....	46
1.7 Протоколи маршрутизації VANET.....	49
Висновки до розділу 1.....	57
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕРЕЖ VANET.....	60
2.1 Основні характеристики мереж автомобільного транспорту.....	60
2.2 Математична модель мережі автомобільного транспорту.....	62
Висновки до розділу 2.....	69
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОКОЛІВ	
МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ	70
3.1 Модифікований протокол маршрутизації FSR.....	72
3.2 Критерії оцінки якості передачі даних для мереж VANET.....	75
3.3 Методика оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для спеціалізованих мереж VANET.....	80
Висновки до розділу 3.....	82
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМИ ІМІТАЦІЙНОГО	
МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ АВТОМОБІЛЬНОГО	
ТРАНСПОРТУ.....	84
4.1 Аналіз існуючих систем імітаційного моделювання VANET.....	84

	16
4.2 Порівняльний аналіз VANET-симуляторів.....	88
4.3 Вибір середовища імітаційного моделювання.....	93
4.3.1 Розширення функціональності NS-2.....	94
4.4 Розробка сценарію моделювання.....	96
4.4.1 Підготовка топологічної карти зони моделювання.....	97
4.5 Вибір моделі мобільності.....	98
4.5.1 Аналіз існуючих генераторів мобільності.....	98
4.5.2 Аналіз можливостей генераторів мобільності.....	102
4.6 Перевірка імітаційної моделі.....	105
4.7 Оцінка якості протоколів маршрутизації для бездротових мереж автомобільного транспорту.....	108
4.7.1 Дослідження впливу щільності мережі на якість обслуговування.....	109
4.7.2 Дослідження впливу мережевого навантаження на якість обслуговування.....	111
4.7.3 Дослідження впливу розміру пакетів на якість обслуговування.....	113
Висновки до розділу 4.....	115
ВИСНОВКИ.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	117
ДОДАТОК А.....	127
ДОДАТОК Б.....	128

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CAM - Cooperative Awareness Messages - повідомлення систем спільного управління транспортною системою.

CCH - Control Channel - канал управління.

CEN - Comite Europeen de Normalisation - Європейський комітет по стандартизації.

CS - Carrier Sense Range - діапазон чутливості несучої.

CSMA / CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - множинний доступ з детектуванням несучої і униканням колізій.

CW - contention window - конкурентне вікно.

D2D - Device-to-Device - взаємодія типу «пристрій-пристрій».

DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency - Агентство передових оборонних дослідницьких проектів.

DCF - Distributed Coordination Function - розподілена функція координації.

DSRC - Dedicated Short-Range Communications - технологія зв'язку на короткій відстані.

EDCA - Enhanced Distributed Channel Access - розширений доступ до розподіленого каналу.

ETSI - European Telecommunications Standards Institute - європейський інститут по стандартизації в галузі телекомунікацій.

FIFO - First In, First Out - перший прийшов, перший пішов.

GPS - Global Positioning System - глобальна система позиціонування.

IEC - International Electrotechnical Commission - міжнародна електротехнічна комісія.

IP - Internet Protocol - інтернет-протокол.

IPv6 - Internet Protocol version 6 - інтернет-протокол версії 6.

ISO - International Organization for Standardization - міжнародна організація по стандартизації.

ITU - International Telecommunication Union - міжнародний союз електрозв'язку.

LLC - Logical Link Control - підрівень управління логічними зв'язками.

LTE - Long-Term Evolution - «довгострокова еволюція» - стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних для мобільних телефонів і інших терміналів, що працюють з даними.

MAC - Media Access Control - каналний рівень моделі OSI.

OBU - On Board Unit - блок, який встановлюється в автомобілі для організації взаємодії в мережах VANET.

OSI - Open System Interconnection - модель взаємодії відкритих систем.

OTRS - On-The-Road Services - послуги, що надаються учасникам дорожнього руху.

PCF - Point Coordination Function - централізована функція координації.

PHY - physical layer - фізичний рівень моделі OSI.

QoS - Quality of Service - якість обслуговування.

RSU - Road Side Unit - стаціонарна телекомунікаційна станція, що встановлюється уздовж дорожньої інфраструктури.

SAE - Society of Automotive Engineers - спільнота автомобільних інженерів.

SAP - Service Access Point - точка доступу до сервісів.

SCH - Service Channel - канал надання сервісів.

SINR - Signal to Interference Noise Ratio - співвідношення сигнал / (шум + інтерферуючий вплив).

V2H - Vehicular to Home - з'єднання «автомобіль - домашня станція зв'язку».

V2I - Vehicle to Infrastructure - з'єднання «автомобіль - фіксована інфраструктура».

V2V - Vehicle to Vehicle - з'єднання «автомобіль - автомобіль».

V2X - V2V and / or V2I - з'єднання «автомобіль - автомобіль» або «автомобіль - фіксована інфраструктура».

VANET - Vehicle AdHoc Network -спеціалізована мережа автомобільного транспорту.

WAVE - Wireless Access in Vehicular Environments - бездротовий доступ в автомобільному середовищі.

WiFi-Wireless Fidelity- «бездротова відданість» - технологія бездротового локального зв'язку.

WSM - WAVE Short Message - короткі повідомлення, які передаються по протоколу WSMP.

WSMP - WAVE Short Message Protocol - протокол передачі коротких повідомлень в середовищі WAVE.

ВСТУП

Актуальність теми дисертації. 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 площі 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 ХХІ століття, в рамках концепції Інтернету Речей (ІоТ) 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 802.11 p. 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.

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

Ступінь розробленості теми. На поточний момент існує чимала кількість робіт, присвячених дослідженню проблем організації систем безпеки дорожнього руху на основі мереж VANET. Серед авторів можна зустріти як вітчизняних, так і зарубіжних вчених:

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 розроблених протоколів маршрутизації для мереж VANET.

Мета роботи і завдання дослідження.

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.

Поставлена мета досягається за рахунок вирішення наступних основних завдань:

- розробка комплексних критеріїв якості передачі даних для спеціалізованих 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.

Предмет дослідження – протоколи маршрутизації спеціалізованих бездротових мереж автомобільного транспорту.

Об'єкт дослідження - процес підвищення ефективності передачі даних в мережах VANET.

Наукова новизна.

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.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНЦЕПЦІЙ РОЗВИТКУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1 Цілі і завдання Інтелектуальних Транспортних систем

Розвиток сучасного автотранспорту вже немислимо без застосування Інтелектуальних Транспортних систем (ІТС), початковим завданням яких була організація інформаційного обміну між транспортними засобами (ТЗ), з метою забезпечення учасників дорожнього руху необхідною інформацією для запобігання дорожніх інцидентів. Рішенню саме цієї задачі почали приділяти все більшу увагу в науковому співтоваристві починаючи з кінця ХХ століття.

Як відомо, прогрес не стоїть на місці, оскільки з плином часу зміни торкнулися і саме розуміння ІТС. Якщо спочатку ІТС розглядали виключно як інструмент підвищення рівня безпеки на наземному транспорті, то подальший аналіз основних проблемних областей поставив наукове співтовариство перед фактом необхідності розширення функціоналу [1-5]. Причому цей процес повинен був враховувати як цілі і завдання численних представників автомобільної промисловості, так і сучасні тенденції розвитку ринку телекомунікацій. Очевидно, що гармонізація процесу формування стандартів та рекомендацій у сфері ІТС немислима без тісної взаємодії фахівців з обох областей. В рамках даного процесу взаємодії проводилося виділення і градація розв'язуваних прикладних задач з подальшим формуванням окремих напрямів дослідження. Надалі під кожний з цих напрямків у рамках організацій по стандартизації були створені спеціальні робочі групи, які і зараз займаються розробкою стандартів та узгодженням їх на міжнародному рівні.

На сьогоднішній день в рамках концепції ІТС сформувалися цілком чіткі цільові напрями розвитку, прийняті до дослідження і розробки [6, 7]. Серед них слід зазначити такі, а саме:

- системи управління стаціонарними засобами інформування учасників дорожнього руху;
- системи управління засобами регулювання транспортних потоків;
- системи організації пріоритетного проїзду;
- системи автономного управління перевезеннями;
- інтелектуальні системи навігації;
- системи автоматизованих платежів;
- довідкові системи для мандрівників;
- системи моніторингу дорожніх пригод;
- системи моніторингу стану дорожнього покриття;
- ряд систем для підтримки екологічних видів транспорту (електромобілів).

Глобальну мету такого тренду розвитку можна сформулювати як створення комплексної системи надання сервісів, організації взаємодії, а також контролю і управління транспортними потоками з метою підвищення ефективності процесу перевезень.

Подібний комплексний характер ІТС може бути досягнутий тільки за рахунок застосування інноваційних підходів, пов'язаних з використанням високих технологій і передових розробок в області інформаційних систем, сенсорних мереж, контролерів, методів взаємодії та математичних методів оптимізації [8, 9]. Поєднання зазначених підходів дозволяє досягти ключового показника, такого як стабільність надання основних сервісів в умовах високої мобільності цільових об'єктів системи. Причому даний показник є основним, як для сервісів, пов'язаних з безпекою, так і для комерційних сервісів.

Сучасні завдання, які вирішуються в рамках концепції ІТС можна сформулювати наступним чином [10]:

- переведення безпеки дорожнього руху на якісно новий рівень;
- забезпечення оперативності реакції на ДТП, а також інциденти природного або техногенного характеру, що представляють небезпеку для

учасників дорожнього руху;

- оптимізація пропускної здатності існуючої транспортної інфраструктури;
- підвищення якості надання послуг перевезення на громадському транспорті;
- формування інформаційної інфраструктури в цілях підтримки систем планування та розвитку транспортної інфраструктури;
- контроль технічного стану існуючої транспортної мережі;
- контроль дотримання ПДР;
- автоматизація процесів електронних платежів на транспорті;
- підвищення рівня інформаційного забезпечення учасників дорожнього руху;
- зниження шкідливого впливу транспорту на екосистему.

1.2 Зарубіжні проекти в області ІТС

У США, як у засновника цього напрямку, було прийнято рішення адаптувати для даних задач технологію взаємодії на коротких відстанях (Dedicated Short-Range Communications, DSRC). Дана технологія спочатку розроблялася управлінням перспективних дослідницьких проектів Міністерства оборони США (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) для військових цілей. Адаптацією DSRC під потреби міжмашинної взаємодії з 2002 року зайнялися два консорціуми Vehicle Safety Communication Consortium (VSCC) і Vehicle Infrastructure Integration Consortium (VIIC) при фінансовій підтримці департаменту транспорту США (US Department of Transportation, US DOT) [11].

Поряд з США, дослідження і розробки у сфері міжмашинної взаємодії отримали популярність і в Європі. Цій тематиці були присвячені такі проекти як: (Preventive and active safety applications, PREVENT), (Network on Wheels, NoW) [12, 13], (Advanced driver support system based on V2V communication

technologies, CarTALK2000) [87]), (Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety, SafeSpot), (Cooperative vehicle - infrastructure systems, CVIS), (European Road Transport Telematics Implementation Coordination, ERTICO), (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe, DRIVE). В цілях консолідації досліджень в області VANET була створена спеціальна організація Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC) [14], що об'єднала найбільших гравців автоіндустрії, таких як Daimler, BMW, Audi, Fiat, Renault, а так само ряд дослідних груп при Європейських університетах [52].

В даний час питаннями розробки уніфікованих підходів застосування стандартів ISO і IEC (International Electrotechnical Commission) [15] на території країн Європи займається Європейський комітет зі стандартизації CEN (Comité Européen de Normalisation).

В Японії, яка згодом зайняла одну з передових позицій в області розвитку ІТС [16], можна виділити наступні проекти, присвячені питанням підвищення безпеки дорожнього руху і ефективності транспортних потоків: Advanced Cruise-Assistance Highway Systems (AHS), Advanced Safety Vehicle (ASV). Дані проекти реалізуються за підтримки міністерства землі, інфраструктури і транспорту та туризму (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT). Проект ASV переслідує мету організації взаємодії класу C2C, з урахуванням вже встановлених на ТЗ численних бортових систем навігації та управління. На відміну від ASV, проект AHS, що просувається асоціацією ASHRA (Advanced Cruise Assistance Highway system Research Association), націлений на формування взаємодії класу C2I, актуального в першу чергу в рамках швидкісних магістралей.

Починаючи з 2004 року, з метою формування єдиної інфраструктури для інформаційного обміну, яка є властивою основній ідеї ІТС, в Японії був запущений проект під назвою SMARTWAY. Завданням даного проекту стала інтеграція проектів C2CC і C2IC для забезпечення можливості надання сервісів глобального контролю та управління транспортними потоками,

підвищення безпеки водіння і надання додаткових комерційних послуг для учасників дорожнього руху [16].

1.3 Стандарти в області ІТС

Найважливішим аспектом сумісності будь-якої технології на національному, міждержавному і міжнародному рівнях, є стандартизація складу, інтерфейсів взаємодії, структур даних і систем управління. Щодо ІТС, зазначені галузі стандартизації набувають додаткову градацію на міські і магістральні в залежності від зони застосування. Кожна з цих зон вимагає власні підходи до побудови та параметри функціонування.

Не менший інтерес представляє регламентування впровадження технологій ІТС в різних країнах. Він нерозривно пов'язаний з необхідністю врахування таких наступних факторів, а саме:

- специфіка розподілу радіочастотного спектра;
- особливості існуючої інфраструктури;
- нормативні вимоги.

Проте високі темпи розвитку автомобільної промисловості, продиктували паралельне виникнення активного інтересу до організації ІТС у всьому світі. З урахуванням цього, розробкою стандартів за даним напрямом розвитку інформаційних технологій з деяким часовим зсувом зайнялися відразу кілька організацій.

Зародження стандартизації області ІТС можна вважати 1992 рік, коли в рамках Міжнародної організації по стандартизації (International Organization for Standardization, ISO), було створено Технічний комітет 204

«Інтелектуальні транспортні системи» (ISO / TC 204 Intelligent transport systems). Завданням цього комітету є стандартизація інформаційних систем, систем взаємодії та управління міським і сільським наземним транспортом [56]. У процесі розвитку всередині комітету було створено 16 робочих груп, що взяли на себе обов'язки з виконання досліджень та

стандартизації за напрямками, наведеними в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Склад комітету ISO/TC 204

Робоча група	Напрямок стандартизації
ISO/TC 204/WG 1	Архітектура ІТС
ISO/TC 204/WG 3	Технології баз даних ІТС
ISO/TC 204/WG 4	Автоматизація ідентифікації ТЗ та обладнання
ISO/TC 204/WG 5	Збір платежів
ISO/TC 204/WG 7	Загальне управління парком комерційних/вантажних перевезень
ISO/TC 204/WG 8	Громадський транспорт і транспорт екстрених служб
ISO/TC 204/WG 9	Інтегрована інформація про управління і контроль за транспортом
ISO/TC 204/WG 10	Інформаційні системи для подорожей
ISO/TC 204/WG 14	Системи управління та попередження на дорогах і в МС
ISO/TC 204/WG 16	Методи взаємодії
ISO/TC 204/WG 17	Взаємодія систем ІТС з персональними мобільними пристроями
ISO/TC 204/WG 18	Об'єднання різних ІТС

Європейський комітет зі стандартизації (*Comite Europeen de Normalisation, CEN*). У тому ж 1992 році до розробки стандартів під ІТС на території Європи приступив CEN. Для цього в рамках комітету було створено 17 робочих груп, що виконували дослідження і стандартизацію за напрямками, наведеними в Таблиці 1.2 [17].

Крім CEN розробленням стандартів, які відносяться до області ІТС, в Європі надалі зайнялися і інші учасники об'єднання Європейських Організацій із Стандартизації (*European Standardization Organizations, ESO*). З метою формування єдиного підходу до розгортання ІТС систем на території Європи у відповідності з директивою Ради Європи та Європейського Парламенту (*Directive 2010/40/EU*) [18], Європейська Комісія висунула вимогу до учасників ESO про необхідність підтримки розробленого нею фреймворку в рамках мандата (EC M/453) [19]. Цей мандат регламентує

розробку в найкоротші терміни технічних специфікацій і рекомендацій в області взаємодії, структури даних, типів додатків і безпеки. Однак Європейський комітет електротехнічної стандартизації (European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC) відмовився прийняти мандат, внаслідок чого припинив розробку стандартів у цій галузі. CEN і ETSI приступили до розробки серії стандартів і технічних специфікацій з кодом EN [2].

Таблиця 1.2 – Склад комітету CEN/TC 278

Робоча група	Напрямок стандартизації
CEN/TC 278/WG 1	Збір платежів
CEN/TC 278/WG 2	Вантажні перевезення
CEN/TC 278/WG 3	Громадський транспорт
CEN/TC 278/WG 4	Інформація про трафік і для мандрівників
CEN/TC 278/WG 5	Управління трафіком
CEN/TC 278/WG 6	Обслуговування парковок
CEN/TC 278/WG 7	Обмін даними між дорожніми службами та різними картографічними службами
CEN/TC 278/WG 8	Управління трафіком. Організація взаємодії WG3 і WG4
CEN/TC 278/WG 9	DSRC
CEN/TC 278/WG 10	Взаємодія типу «людина-машина»
CEN/TC 278/WG 11	Інтерфейси між системами і підсистемами
CEN/TC 278/WG 12	Ідентифікація ТЗ
CEN/TC 278/WG 13	Архітектура ІТС
CEN/TC 278/WG 14	Пошук викрадених ТЗ
CEN/TC 278/WG 15	Управління рівнем впливу МС на екологію (eSafety)
CEN/TC 278/WG 16	Об'єднання різних ІТС
CEN/TC 278/WG 17	Міські ІТС

Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (*European Telecommunications Standards Institute ETSI*) [16]. ETSI після формування угоди про спільну роботу з CEN в рамках мандата EC M/453 приступила до

публікації загальних на території Європи стандартів для об'єднання різних ІТС (cooperative-ITS, C-ITS), з метою забезпечення взаємодії модулів різних виробників ТЗ і RSU. Перший реліз був опублікований в 2014 році. Крім цього ETSI приступив до робіт по зниженню інтерференції між європейським DSRC обладнанням CEN та ІТС.

Надалі, також в 2014 році, ETSI опублікував ще дві специфікації для ІТС, що стосуються сервісів. Перша специфікація - це специфікація спільних інформаційних сервісів (EN 302 637-2) [20]. Вона регламентує способи і технології інформаційної взаємодії класу V2V, V2I, I2V і I2I, що є базовим для реалізації функціоналу БДР в ІТС. Крім цього дана специфікація описує синтаксис і семантику повідомлення, за допомогою яких здійснюється взаємодія між об'єктами ІТС. Друга специфікація - це специфікація сервісів децентралізованого інформування оточення (EN 302 637-3) [10]. Основним принципом даного сервісу є організація передачі попереджень про виниклі по близькості небезпеки або зміни режиму руху. Попередження передається на найближчий RSU, а далі транслюється всім ТЗ, які наближаються. Отримавши повідомлення, на додаток OBU формуються пропозиції про можливі способи реакції для водія.

Об'єднання технічних комітетів CEN і ETSI, у сукупності зі щільною взаємодією з найбільшими гравцями автоіндустрії, дозволило прискорити розробку єдиних стандартів для ІТС в Європі. В цілях подальшого їх розвитку Європейський Союз забезпечив фінансування таких проектів, як eCoMove, Drive C2X та COMeSafety [21, 22], що є найбільшими споживачами стандартів в області ІТС. Взаємодія з виробниками інфраструктурного обладнання, для врахування їх можливостей при створенні стандартів, було налагоджено через функціональні групи ERTICO–ITS Europe, Amsterdam Group та Car 2 Car Communication Association. Одночасно, для забезпечення сумісності на міжнародному рівні, було організовано взаємодію з такими організаціями, як ISO, IEEE і SAE [2].

Міжнародний Союз Електрозв'язку (МСЕ) (International

Telecommunication Union, ITU). Разом з ISO і IEC, MCE є визнаною організацією по стандартизації. Створення міжнародних стандартів для ІТС в рамках МСЕ організовано за рахунок створення об'єднаних оперативних груп з ISO. Подібна взаємодія дозволяє скоротити час виведення на світовий ринок найбільш якісних і сумісних продуктів комунікацій об'єктів ІТС [16].

Асоціація по стандартизації при інституті інженерів електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association, IEEE-SA). IEEE-SA це організація при IEEE, що займається розробкою глобальних стандартів для широкого спектру галузей промисловості. Так, однією з областей стандартизації, в якій важлива роль належить IEEE, є ІТС. Розробкою стандартів у цій галузі займається робоча група IEEE 802.11. Початок робіт з розробки перших релізів стандарту датується 2005 роком. Протягом чотирьох років даною робочою групою було опубліковано 10 релізів стандарту IEEE 802.11 р, доки в липні 2010 року більшістю голосів не була прийнята остаточна версія під номером 11. У цьому стандарті специфікується структура та формат даних для каналного (MAC) та фізичного (PHY) рівнів, а так само особливості реалізації механізму пріоритетності різних типів трафіку.

Розроблене IEEE сімейство стандартів IEEE 1609 отримало назву *Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)*. Воно визначає архітектуру, сервіси і інтерфейси взаємодії виду V2V і V2I для систем БДР [1]. Разом ці стандарти становлять основу для широкого кола додатків транспортного середовища. Серед них такі, а саме: додатки пов'язані з БДР, додатки автоматизації платежів, програми навігації, додатки контролю і управління трафіком і багато інших. Всього в сімействі WAVE налічується сім стандартів:

IEEE 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture. Описує WAVE архітектуру і сервіси, необхідні для взаємодії багатоканальних пристроїв DSRC/WAVE [23].

IEEE 1609.1-2006 - Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular

Environments (WAVE) - Resource Manager. Специфікує інтерфейси і сервіси менеджера ресурсів, що надаються додатками WAVE. Даний стандарт визначає структуру і формат потоків даних усередині систем WAVE. Для цих цілей в ньому визначений формат керуючих повідомлень і перелік можливих відповідей на них, а також формат даних, який повинен використовуватися додатками для організації взаємодії між окремими компонентами системи. Крім цього в ньому визначено формати запитів та повідомлень про статус [24].

IEEE 1609.2 a-2017 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages - Amendment 1. Даний стандарт визначає механізми забезпечення безпеки взаємодії об'єктів системи WAVE. Для цього специфікується формат повідомлень безпеки, обставини, при яких здійснюється обмін даними повідомленнями, а також варіанти реакції системи на дані повідомлення в залежності від умов їх надходження. Також в стандарті визначено механізми обміну сертифікатами. У загальному випадку, реалізація механізмів забезпечення безпеки при взаємодії об'єктів WAVE будується на таких базових принципах як конфіденційність, аутентифікація, авторизація і цілісність [25].

IEEE 1609.3-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services. Даний стандарт визначає сервіси транспортного і мережевого рівня, включаючи адресацію, маршрутизацію і підтримку безпечних з'єднань. У стандарті також визначено способи підтримки додатками протоколу IPv6 і протоколу коротких повідомлень (WAVE Short Message Protocol, WSMP) в якості альтернативи стека TCP/UDP/IPv6. Крім того, специфікується база керуючої інформації (Management Information Base, MIB) і підрівень управління логічним зв'язком (Logical Link Control, LLC) [26].

IEEE 1609.4-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation. Даний стандарт описує

структуру вдосконаленого під цілі і завдання WAVE каналного рівня стандарту IEEE 802.11. У ньому специфіковано способи роботи додатків WAVE в багатоканальному середовищі, а також метод управління доступом до каналу, що передбачає розподіл пакетів за потрібними каналами в необхідні моменти часу [27].

IEEE 1609.11-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS). Метою даного стандарту є визначення сервісів і формату захищених повідомлень для систем електронних платежів. У стандарті описано модель взаємодії прикладних сервісів і профілів для аутентифікації платежів і процес передачі платіжних даних, таких як інформація про рахунок, квитанції, чеки та підтвердження операцій, за допомогою DSRC. При цьому мається на увазі, що взаємодія між обладнанням відбувається у відповідності зі стандартами IEEE 1609.3 і IEEE 1609.4 [28].

IEEE 1609.12-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations. У різних частинах сімейства стандартів IEEE 1609 застосовуються певні ідентифікатори. Способи призначення цих ідентифікаторів, а також способи їх використання описуються в даному стандарті [29].

Спільнота автомобільних інженерів (Society of Automotive Engineers, SAE). Не малу роль в розвитку ІТС грають рекомендації, що випускаються такими організаціями, як SAE. Серед них варто відзначити такі, як SAE J2365 – рекомендація щодо розрахунку часу для систем навігації і прокладання маршрутів, SAE J2678 – рекомендація щодо доступності систем навігації і прокладання маршрутів під час подорожей, SAE J2945 – рекомендація щодо використання DSRC та ін.

Асоціація радіопромисловості та бізнесу (Association of Radio Industries and Businesses, ARIB). В Японії лідируюче місце по створенню стандартів в області ІТС належить ARIB. Випущений нею стандарт ARIB

STD-T55, вже в 1997 році регламентував правила побудови архітектури ІТС і способи внутрішньо системної взаємодії на базі DSRC. Пізніше, у 2001 році, асоціація випустила оновлений стандарт по застосуванню DSRC, ARIB STD - T75. У ньому також проходили специфікацію параметри радіо інтерфейсу між OBU і RSU. Випущений в 2004 році стандарт ARIB STD-T88 (Dedicated Short-Range Communication (DSRC) Application Sub-Layer), розроблений з метою розширення переліку методів взаємодії в рамках систем DSRC, в цілях підтримки багатьох програм, описаних у стандарті ARIB STD-T75 [2].

Стандарт ARIB STD-T110, випущений в грудні 2012 року, визначив шість основних прикладних інтерфейсів для організації взаємодії типу I2V в рамках систем DSRC. Дані інтерфейси розширюють функціонал протоколу DSRC. Вони дозволяють реалізувати взаємодію декількох різнотипних не-IP додатків з різною функціональністю з базовими станціями, як це регламентовано в ARIB STD-T75 і ARIB STD-T88.

1.4 Архітектура ІТС

Незважаючи на величезну роботу по стандартизації, виконану у всьому світі, сформувати детальну картину універсальної архітектури системи не видається можливим. Це пов'язано з тим, що практична реалізація систем тісно зав'язана на цілі і завданні кожного регіону окремо. Перелік вибраних при цьому технологій, так само обумовлюється локальними факторами, такими як доступність пристроїв і датчиків, а також наявністю компетенцій в області впровадження. Як результат, і без того комплексний характер ІТС, набуває в глобальному плані неоднорідну структуру.

Однак, навіть з урахуванням вказаних відмінностей, ключовим напрямком розвитку залишається інтеграція регіональних підсистем з метою створення глобальної ІТС. Головною передумовою для цього є характер об'єктів керування, що полягає у високій мобільності ТЗ. Беручи до уваги можливість ТЗ переміщатися між регіонами, очевидно, що незважаючи на

приватні реалізації інфраструктурної частини, ІТС не повинна втрачати свої функціональні можливості в глобальному плані. Це означає, що інтерфейси I2V (Infrastructure to Vehicle) і I2I (Infrastructure to Infrastructure) повинні бути реалізовані у відповідності з міжнародними стандартами. Як результат, у сучасних стандартах замість спроб опису загальної архітектури ІТС, наводяться моделі взаємодії як окремих об'єктів, так і цілих підсистем, що відповідають вимогам загальноприйнятих технічних регламентів. Узагальнена модель взаємодії об'єктів усередині транспортної системи, описана в стандарті ETSI EN 302 665, наведена на рис. 1.1 [30].

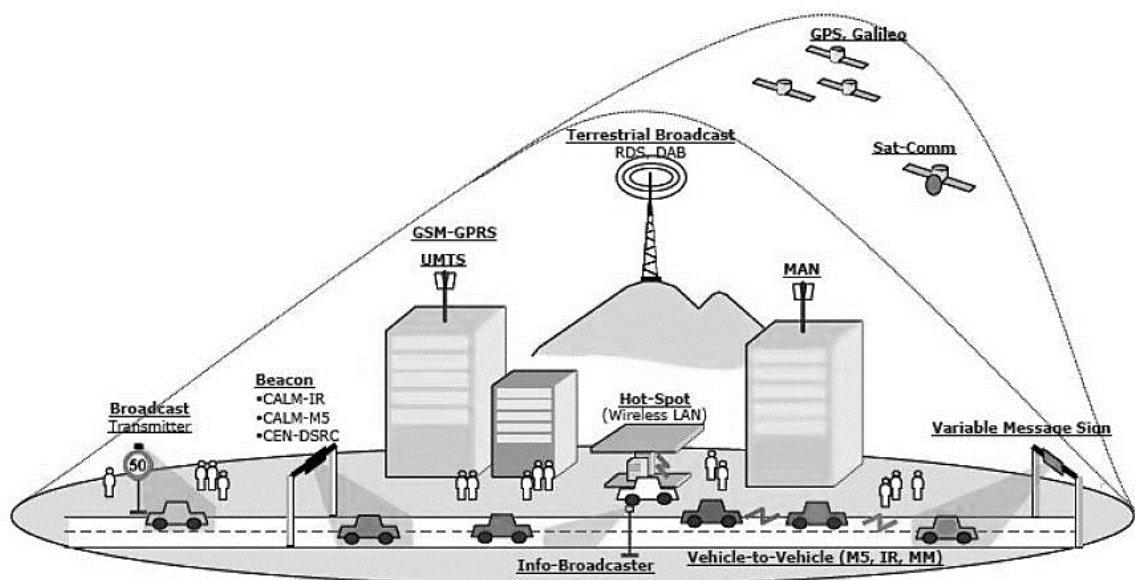


Рисунок 1.1 – Узагальнена модель взаємодії для ІТС [30]

Враховуючи специфіку транспортних систем, широкий спектр застосовуваних технологій і відмінності регіональних вимог, в ході розробки стандартів взаємодії і формування однакових архітектурних підходів побудови ІТС, необхідно брати до уваги такі суттєві аспекти:

- мобільність вузлів мережі, що приводить до високої динаміки зміни топології;
- потенційну можливість підтримки будь-яких типів технологій зв'язку;

- потенційну можливість підтримки будь-яких видів додатків, включаючи такі які розроблені спеціально для ІТС;
- використання інфраструктуру ІТС як прозорий тунель, з метою транзиту власних даних;
- використання ІТС станції виключно для організації внутрішньої взаємодії між підключеними пристроями.
- можливість швидкої і гнучкої адаптації під потреби користувачів в розрізі смуги пропускання, доступності каналу зв'язку, надійності з'єднань, захищеності каналів зв'язку і вартості (у разі використання комерційних сервісів);
- наявність ефективних механізмів пріоритетності для різних класів додатків;
- потенційну можливість підтримки сумісності додатків і технологій зв'язку з урахуванням відмінностей у вимогах до функціоналу ІТС в різних регіонах;
- підтримку модульного принципу побудови з можливістю нарощування функціоналу ІТС станцій, за допомогою установки додаткових плат розширення;
- підтримку профілювання послуг;
- глобальну застосовність і масштабованість.

З урахуванням сформованого в ході еволюції ІТС переліку аспектів реалізації найбільш гнучкої архітектури, в стандарті ETSI EN 302 636-3 наводяться базові принципи побудови архітектури на рівні підсистем. У ньому наведена мережева модель взаємодії станцій ІТС між собою, а також станцій ІТС і зовнішніх підсистем [31]. Стандартизація на рівні окремих станцій ІТС виконана у вигляді узагальненої еталонної архітектури вузлів, представленої взаємопов'язаними функціональними блоками з описом їх основного призначення [20, 32, 33].

Мережева архітектура.

Основними компонентами архітектури ІТС є комунікаційні станції

(ІТС-3). Вони виконують дві базові ролі [34]:

- є вузлами складової мережі, працюючи як ініціатори або приймачі з'єднань;
- є транзитними вузлами, оскільки мережа ІТС може працювати в режимі ad-hoc.

Утворені на основі різних ІТС станцій мережеві структури диференціюються за функціональною ознакою на внутрішні і зовнішні мережі. Зовнішні мережі відповідають за взаємодію станцій між собою і за підключення до інших зовнішніх мереж. Серед них виділяють наступні класи мереж:

- ІТС ad hoc мережі;
- мережа доступу;
- базова мережа.

Завданням внутрішніх мереж є організація взаємодії внутрішніх компонентів ІТС станцій.

Кожна мережева структура ІТС має мету реалізації підтримки додатків, які вирішують, щонайменше, одного з базових завдань. До таких завдань належать організація безпеки дорожнього руху, ефективність управління автомобільним трафіком, надання інформаційно-розважального контенту і підтримка працездатності комерційних додатків. Проте взаємодія всередині одиначної мережі не може забезпечити повного спектру функціональності ІТС. У зв'язку з цим окремі мережі комбінуються в комплексну мережеву архітектуру [34].

ІТС ad hoc мережа дозволяє взаємодіяти ТЗ між собою, а також з RSU і персональними мобільними пристроями. Дана взаємодія здійснюється з використанням бездротових технологій зв'язку і дозволяє вузлам формувати власну довільну мережеву топологію без необхідності управління з боку інфраструктури. В якості бездротових технологій для утворення таких мереж може використовуватися ITS - G5, описана в стандарті EN 302 663 [35] або WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) на базі серії стандартів

IEEE 1609 [24].

Мережа доступу ІТС являє собою виділену мережу, яка надає доступ до специфічних додатків або сервісів, які можуть впроваджуватися й управлятися локальними операторами мережі або дорожніми службами. До завдань даної мережі відноситься з'єднання окремих RSU між собою з метою забезпечення взаємодії між ними, а також між OBU, підключеними до даних RSU. Мережа доступу ІТС може бути використана для підключення RSU, розподілених вздовж дорожньої мережі, до центральної ІТС станції. Формування подібної мережевої архітектури дозволяє організувати трансляцію даних між OBU через локальну інфраструктуру, а не безпосередньо в режимі ad hoc. Однак, у випадку використання для підключення до RSU технологій зв'язку на ближніх дистанціях, сеанс обміну даними з сервісами набуває переривчастий характер.

Мережа загального доступу надає доступ до відкритих мереж загального призначення. Для прикладу, через цю мережу може надаватися доступ до Інтернет для OBU і персональних мобільних пристроїв, підключених до OBU. *Мережа обмеженого доступу*, на відміну від мережі загального доступу, призначена для обслуговування обмежених груп осіб з надання їм послуг захищених з'єднань. Для прикладу, дані послуги можуть використовуватися для організації доступу до закритих корпоративних сегментів мережі приватних компаній.

Структура типової ІТС станції.

Будь-яка ІТС підсистема будується на основі взаємопов'язаних ІТС станцій. У свою чергу, кожна станція складається з набору компонентів, взаємодіючих один з одним через внутрішню мережу, як це показано на рис. 1.2.

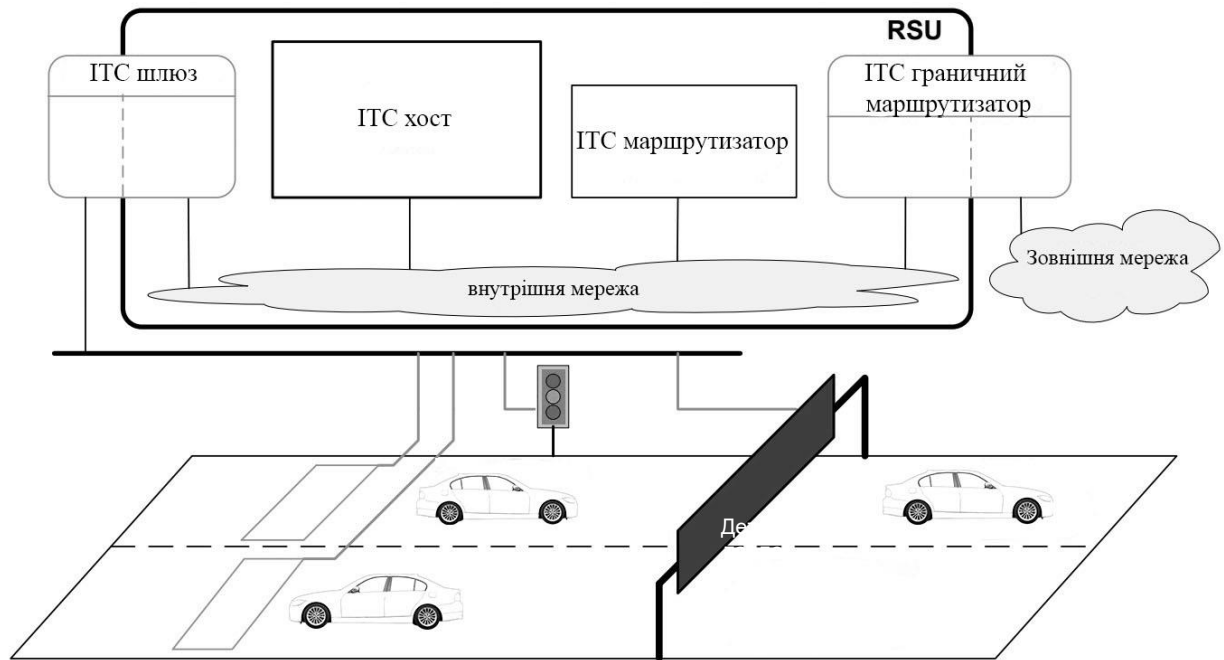


Рисунок 1.2 – Компонентний склад RSU

Згідно стандарту EN 302 636-3 [6], загальна маса компонентів диференціюється за функціональною ознакою на:

- хости;
- шлюзи;
- маршрутизатори;
- граничні маршрутизатори.

ІТС хости реалізують мінімально необхідну функціональність для підтримки працездатності базових додатків.

У завдання *ІТС шлюзів* входить реалізація підтримки нормальної взаємодії різних протокольних стеків на рівнях моделі OSI з 5го по 7-ий. Для цього потрібен механізм конвертації протоколів. *ІТС маршрутизатори* забезпечують функціонал крос-протокольної взаємодії на 3-му рівні моделі OSI. Причому один з протоколів взаємодії повинен обов'язково належати до стандартного стеку ІТС станції.

За аналогією з маршрутизаторами, *граничні маршрутизатори* реалізують функції крос-протокольної взаємодії на третьому рівні моделі OSI. Однак їх ключовою відмінністю є забезпечення взаємодії із зовнішніми

мережами, які можуть використовувати відмінні від стандартних для ІТС станцій механізми керуючих взаємодій і безпеки.

1.5 Автомобільні мережі в структурі ІТС

Одним з найважливіших компонентів ІТС є автомобільна мережа VANET (Vehicular Ad Hoc Network), вузли якої представлені самими транспортними засобами за встановленими спеціалізованими модулями зв'язку. Першочерговим завданням даного різновиду мереж є оповіщення учасників дорожнього руху про виникнення нештатних ситуацій. Дані функціональні можливості реалізуються за допомогою автоматизованої розсилки повідомлень додатками, що пов'язані із безпекою дорожнього руху. Супутньою проблемою, яка вирішується шляхом забезпечення своєчасного інформування водіїв про дорожню обстановку, є перерозподіл транспортних потоків, що дозволяє зменшити величину заторів.

VANET є частиною концепції ІТС, що виконує роль формування високодинамічної мережевої структури, яка самоорганіується для передачі інформації про дорожній трафік і інциденти. Мережі VANET є відправною точкою для побудови повномасштабної ІТС, оскільки вони можуть функціонувати разом як з інфраструктурними станціями, так і ізольовано. Висока вартість розгортання інфраструктурної частини ІТС додатково підкреслює вагомість мереж VANET у складі загальної комплексної системи [37, 38].

Мережі VANET володіють рядом особливостей, такими як висока швидкість руху ТЗ, висока щільність вузлів, мінливість структури та складу мереж, найчастіше кластеризація на ізольовані ділянки. Все це накладає особливі вимоги на режими і параметри функціонування мережі. Так, ключовими вимогою є мінімізація затримок для передачі повідомлень від програм безпеки дорожнього руху і підтримання високого рівня зв'язності

мережі. Подібні вимоги передбачають необхідність використання спеціалізованої технології бездротового зв'язку WAVE [2].

Архітектура мереж VANET.

Як і для будь-якої системи, ключовими характеристиками архітектури VANET, є її складові, моделі взаємодії, методи ідентифікації та механізми безпеки. Оскільки основою VANET є WAVE, то ці характеристики визначаються сімейством стандартів IEEE 1609. На прикладному рівні, у разі побудови системи DSRC/WAVE, до зазначеного сімейства стандартів додається стандарт SAE J2735.

Склад VANET.

Основними елементами архітектури VANET є спеціалізовані телекомунікаційні модулі OBU (On Board Unit), що встановлюються на ТЗ, а також інфраструктурні базові станції RSU (Roadside Unit) з аналогічним набором інтерфейсів зв'язку. OBU є інтегрованими в бортову систему модулями з власними обчислювальними ресурсами, антеною і інформаційним дисплеєм. Крім програмно-апаратних модулів, до складу VANET входять комунікаційні інтерфейси, що дозволяють цим модулям взаємодіяти. В залежності від напрямку передачі інформації між об'єктами, виділяють наступні типи інтерфейсів [39- 41]:

- Vehicle-to-Vehicle (V2V) – коли взаємодіючими об'єктами є OBU. Даний тип взаємодії є основним у разі відсутності інфраструктурних базових станцій. Він дозволяє організувати обмін повідомленнями між МС-учасниками дорожнього руху з метою підвищення ступеня безпеки дорожнього руху;

- Vehicle-to-Infrastructure (V2I) – коли передача інформації ведеться від OBU до RSU. Використовується у випадках передачі інформації через інфраструктуру, в цілях розвантаження бездротових інтерфейсів. Також дозволяє організувати збір інформації у центри управління і організувати системи управління засобами контролю і регулювання транспортних потоків;

- Infrastructure-to-Infrastructure (I2I) – у разі взаємодії RSU між собою.

Даний тип інтерфейсів дозволяє проводити обмін інформацією як по провідних каналах зв'язку, так і по безпроводовим;

- Vehicle-to-X (V2X) – є універсальним типом інтерфейсу, що дозволяє організувати взаємодію типу V2V та/або V2I;

- Vehicular to Home (V2H) – забезпечує взаємодію OBU з іншими IoT об'єктами, встановленими в межах домашньої локації. У доповненні, через V2H може проводитися автономна діагностика МС, з наступним відсиланням даних в сервісні служби. Даний інтерфейс дозволяє розширити область сервісів, які забезпечують комфортність поїздок. Для цього, наприклад, в бортовий комп'ютер може бути задалегідь завантажений маршрут майбутньої подорожі з усіма точками інтересів;

- Vehicle-to-cloud broadband (V2B) – дозволяє взаємодіяти OBU з хмарними сервісами, з використанням широкосмугових технологій передачі даних операторів мобільного зв'язку.

Методи обміну інформацією.

Існують декілька методів передачі інформації в VANET. Працездатність комерційних сервісів здебільшого реалізується за рахунок використання добре знайомої з провідних мереж зв'язки TCP/UDP + IPv6. Для роботи сервісів, пов'язаних з безпекою дорожнього руху або збором статистики про стан транспортних потоків, а також сервісами електронної бездротової оплати проїзду, в стеку передбачений спеціальний протокол WSMP (WAVE Short Message Protocol) [23].

WSMP спроектований спеціально для роботи в середовищі WAVE, з урахуванням вимог до мінімізації затримок. Він дозволяє програмам безпосередньо управляти характеристиками фізичного рівня, такими як номер каналу або потужність сигналу, яка використовується при передачі повідомлення. Модель взаємодії представлена на рис. 1.3.

У разі використання протоколу WSMP, передача інформації ведеться за допомогою спеціальним чином оформлених повідомлень WSM (WAVE Short Message). Однак, незважаючи на ефективність використання ресурсів каналу,

даний протокол має один істотний недолік. Передача повідомлень може вестися тільки в межах зони прямої чутності сигналу. У разі необхідності передачі інформації з використанням ретрансляцій, доводиться використовувати IPv6 з його засобами маршрутизації.

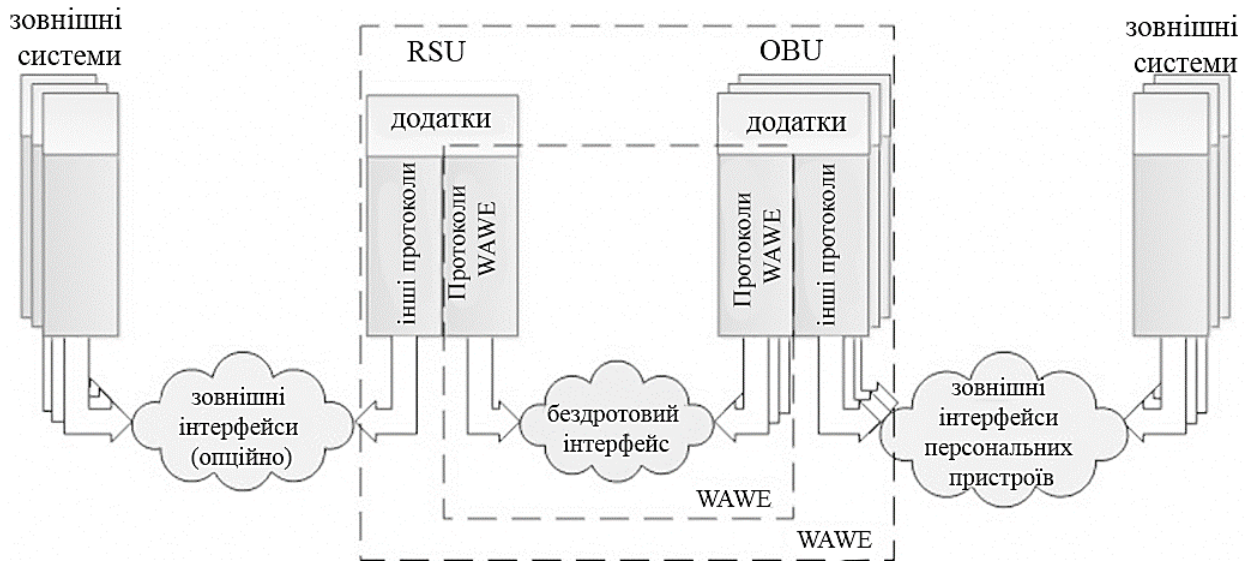


Рисунок 1.3 – Модель взаємодії VANET

Використання широкомовного режиму розподілу інформації по мережі пов'язано зі ще однією проблемою. Якщо процес ретрансляції повідомлень ніяк не обмежувати, то це призводить до так званого широкомовного шторму. У цьому випадку, при передачі повідомлень від вузла до вузла, з кожним новим кроком кількість повідомлень зростає лавиноподібно, приводячи в кінцевому підсумку, до повного вичерпання ресурсів каналу. Підходам вирішення даної проблеми за останні десять років присвячено безліч робіт [42-44]. Однак, беручи до уваги динаміку зміни структури, відмовитися від використання широкомовного режиму не представляється можливим. Подібний висновок очевидний, оскільки передача адресованої інформації не здатна забезпечити своєчасне і в повному обсязі інформування учасників дорожнього руху про небезпеку.

Топології VANET.

Виходячи зі складу автомобільних мереж, очевидно, що вони можуть формувати як однорангову, так і ієрархічну структуру.

У разі тимчасової структури, використання RSU не передбачається. Передача інформації ведеться в режимі «точка-точка» (P2P), або в режимі «точка-багатоточка» (P2MP), для випадків широкомовної трансляції повідомлень. Режим P2MP відповідає мережевій топології «зірка».

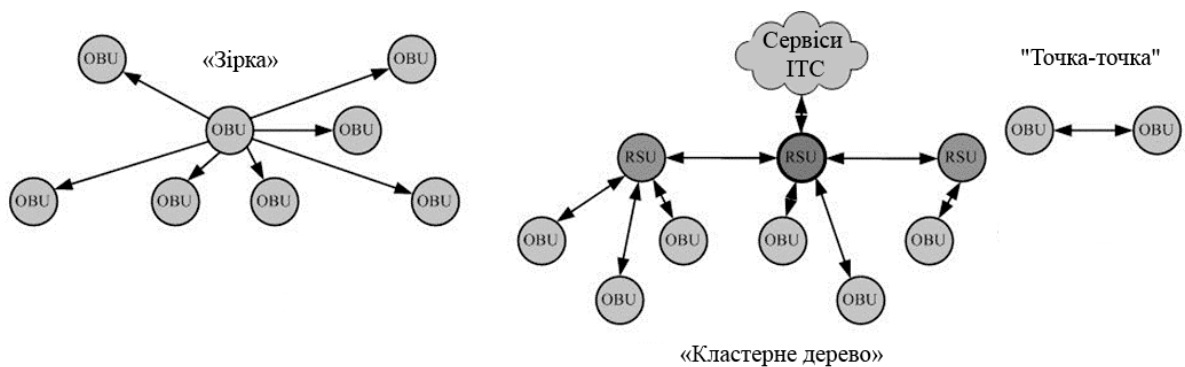


Рисунок 1.4 – Топології VANET

Залучення в інформаційний обмін RSU, дозволяє організувати топологію типу «кластерне дерево». Обмін даними між OBU, а також взаємодія з іншими сервісами ІТС, ведеться через найближчий RSU. Сполучені між собою RSU, дозволяють організувати міжкластерний мережевий обмін інформацією. Це надає можливість суттєво розвантажити бездротовий канал зв'язку, а також підвищити зв'язність мережі. Варіанти мережевих технологій, утворених компонентами VANET, наведені на рис. 1.4.

1.6 Додатки автомобільних мереж

Додатки VANET класифікуються згідно з їх основною метою [34, 45, 46, 2]:

- програми безпеки – це програми, що підвищують безпеку транспортних засобів на дорогах;

- програми управління транспортними потоками – формують інфокомунікаційну структуру, яка переслідує мету оптимізації перевезень;
- програми загального призначення – надають комерційні або розважальні послуги, частина яких може бути з доданою вартістю.

Програми загального призначення

Основною метою програм загального призначення є поліпшення комфорту пасажирів [9]. Пасажири транспортних засобів, які проводять дуже тривалий період часу в поїздах, можуть бути зацікавлені в подібній області застосування автомобільних мереж. Вона полягає у наданні безлічі різних типів інформації. Даним способом пасажирам можуть бути надані такі види інформації як оголошення, розважальний контент, інформацію про погоду, а також докладні вказівки місцезнаходження найближчого ресторану, готелю, кафе. Для водіїв може надаватися додаткова інформація про місцезнаходження найближчих парковок або заправних станцій. Пасажири можуть грати в онлайн-ігри, отримувати доступ до Інтернету і відправляти або отримувати електронні листи, спілкуватися з друзями і виконувати офісні роботи, поки транспортний засіб підключено до інфраструктурної мережі [47-49].

Важлива особливість комерційних додатків полягає в тому, що вони не повинні заважати додатками безпеки. У цьому контексті відповідним рішенням є пріоритезація трафіку і використання окремих фізичних каналів.

Програми управління транспортними потоками

Одним із ключових завдань, покладених на ІТС в міському оточенні, є інтелектуальне управління транспортними потоками. Для цього за допомогою датчиків, встановлених на базових станціях, камер спостереження та інших засобів детектування, збирається інформація про поточний стан транспортних потоків з прив'язкою до ділянок доріг. Зібрана інформація аналізується в центрах координації і на основі результатів аналізу робляться керуючі впливи на засоби координації дорожніх потоків. До таких керуючих впливів відносяться: зміна схеми роботи світлофорів, зміна

швидкісного режиму і різного роду попередження на інформаційних табло [6].

Іншим способом впливу на транспортні потоки є розсилання інформації про затори та дорожню обстановку, безпосередньо на ОВУ. Дана інформація може візуалізуватися на бортових засобах навігації та мотивувати водіїв на вибір альтернативних маршрутів.

Програми безпеки

Основна мета додатків безпеки – підвищити рівень громадської безпеки та уникнути людських жертв. Ключовою характеристикою подібних програм є те, що дані від додатків безпеки доставляються зацікавленим вузлам (транспортним засобам, що наближаються до небезпечної зони) протягом обмеженого часу. В силу критичності до часу такі програми зазвичай вимагають наявності прямого зв'язку між вузлами [50].

Досягнення мети підвищення безпеки дорожнього руху та запобігання нещасних випадків реалізується за допомогою здійснення своєчасного інформаційного обміну типу V2V або V2I, з використанням бездротових технологій зв'язку. Все це допомагає не тільки виключити або, як мінімум, знизити ризики загибелі людей, але і підвищити чистоту навколишнього середовища за рахунок запобігання потенційних розливів забруднюючих рідин, які часто виникають внаслідок аварій [41, 51, 52].

Програми, що відносяться до безпеки, можуть бути згруповані в три основні класи: допомога (навігація, запобігання колективних зіткнень і управління зміною смуг), інформування (про обмеження швидкості або про зону ремонтних робіт) і попередження (післяаварійні, про перешкоди або стани дороги). Прикладом попереджувальної програми може бути повідомлення при екстремому гальмуванні. У цьому випадку при виникненні ДТП, спрацьовуванні подушок безпеки або просто раптового різкому гальмуванні, машинам, що рухаються позаду надсилається повідомлення. Така ж інформація може бути розіслана машинам, що рухаються в зустрічному напрямку. Як результат, будуть сповіщені всі автомобілі, які

потенційно можуть потрапити в аварію [53, 54].

Іншим, більш складним прикладом реалізації додатків безпеки, є система спільного водіння, яка заснована на обміні даними від бортових датчиків або іншою технічною інформацією між машинами. Базова ідея цієї системи полягає в розширенні поля зору водія, за рахунок обробки інформації, що надходить автономними програмами. Як наслідок, водії автомобілів, які прямують з тією ж дорогою, отримують інформацію про небезпеки, перешкоди, транспортному потоці попереду, що в підсумку призводить до більш ефективного і безпечного водіння. Очевидно, що працездатність подібного додатку вкрай залежна від кількості автомобілів оснащених VANET-системами.

1.7 Протоколи маршрутизації VANET

Для мереж VANET була розроблена велика кількість протоколів маршрутизації, які можна класифікувати за різними критеріями, такими як характеристики протоколу, метод маршрутизації інформації, якість обслуговування, мережева архітектура та іншими критеріями.

Грунтуючись на характеристиках протоколу, в роботах, протоколи маршрутизації VANET класифікуються за наступними категоріями: на основі топології, на основі місця розташування, на основі геолокації, широкомовні і кластерні.

Інші дослідники класифікували протоколи маршрутизації VANET на основі мережевої архітектури. За цим критерієм, їх можна розділити на ієрархічні, плоскі і протоколи з урахуванням позиції. Якщо стратегія маршрутизації розглядається як критерій класифікації, протоколи маршрутизації VANET можна розділити на проактивні і реактивні [53].

Більш того, згідно з [54], на основі інформації про маршрутизацію, протоколи маршрутизації можна розділити на дві категорії, а саме на

географічні та топологічні. Однак, коли береться до уваги якість обслуговування, протоколи маршрутизації можна розділити на наступні класи: ієрархічні, плоскі і з урахуванням положення.

Нарешті, при класифікації протоколу маршрутизації відповідно до способу виявлення маршрутів [55] можна розділити на реактивні, проактивні, гібридні і ті, що прогнозують.

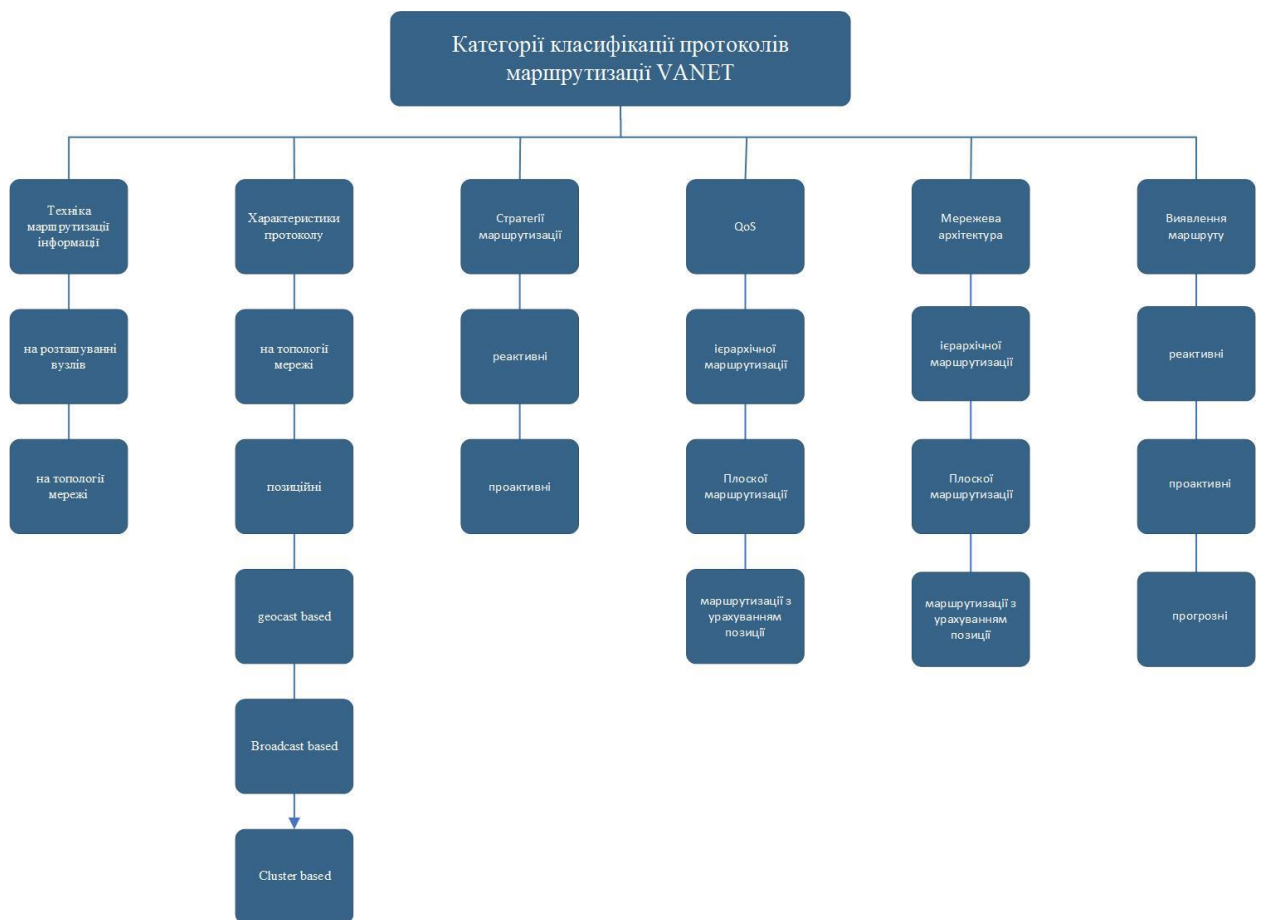


Рисунок 1.5 - Критерії категоризації, які використовуються для класифікації протоколів маршрутизації VANET

На рисунку 1.5 показані різні критерії категоризації, які можна використовувати для класифікації протоколів маршрутизації VANET.

Протоколи на основі топології мережі. Термін «топологія» відноситься до способу з'єднання різних компонентів. У VANET мета протоколів маршрутизації на основі топології - знайти найкоротший шлях

між початковим і кінцевим вузлом. Отже, вся інформація, пов'язана з маршрутизацією, зберігається в таблиці маршрутизації. Залежно від часу, відповідно до якого оновлюються таблиці маршрутизації, протоколи на основі топології можуть бути додатково розділені на три категорії, а саме протоколи проактивної маршрутизації, протоколи реактивної маршрутизації і протоколи гібридної маршрутизації [55].

У протоколах проактивної маршрутизації для кожного вузла інформація про маршрутизацію зберігається в таблиці маршрутизації. Оскільки вузли дуже мобільні, записи маршрутизації, що стосуються вузлів, які залишають мережу, і нових вузлів, що приєднуються до мережі, повинні підтримуватися в актуальному стані. В результаті щоразу, коли вузол приєднується до мережі або залишає її, або коли зв'язок переривається або встановлюється, проактивний протокол ініціює етап оновлення, щоб підтримувати таблиці маршрутизації всіх вузлів в актуальному стані і готовими до використання. Цей процес збільшує накладні витрати протоколу і впливає на пропускну здатність мережі.

Було запропоновано безліч проактивних протоколів, таких як вектор відстані послідовності призначення (DSDV), оптимізована маршрутизація стану каналу (OLSR) і маршрутизація стану «риб'яче око» (FSR).

Протокол DSDV заснований на алгоритмі пошуку найкоротшого шляху, в якому таблиця маршрутизації підтримується кожним вузлом, і яка використовується для зберігання маршрутної інформації для всіх вузлів мережі. Щоб зменшити розмір таблиці маршрутизації в ній зберігається тільки інформація, що відноситься до оптимального або найкоротшого маршрута. Щоб отримати правильну і актуальну інформацію, кожен вузол оновлює свою таблицю маршрутизації момент коли в мережі відбувається подія, обмінюючись таблицями зі своїми сусідами і знову обчислюючи інформацію про маршрут. Отже, циклічні маршрути не дозволені DSDV. Крім того, кількість переданих керуючих повідомлень зменшується, оскільки поновлення пов'язані з подіями, а не з часом. Крім того, розмір таблиці

маршрутизації зменшується, оскільки зберігається єдина інформація про оптимальний маршрут.

З іншого боку, у випадках різкої зміни топології або щільності мережі, DSDV не справляється з навантаженням належним чином, що впливає на ефективність цього алгоритму маршрутизації [56].

Протокол OLSR є розвитком традиційного алгоритму маршрутизації для кабельних мереж, та заснован на визначенні зв'язків між вузлами. Для оновлення інформації про топологію мережі цей протокол використовує періодичний обмін службовими повідомленнями, що містять перелік наявних зв'язків.

Перевага OLSR щодо базового алгоритму полягає у використанні стратегії багатоточечного повторення (MPR, MultiPoint Relaying) для мінімізації довжини службових повідомлень і кількості їх ретрансляції. Ідея цієї стратегії полягає в тому, що для кожного службового повідомлення вузол визначає набір сусідніх вузлів, які мають право його ретранслювати. Кожен вузол мережі, який зможе прийняти це повідомлення, може використовувати його для оновлення таблиць маршрутизації, але ретранслювати далі можуть тільки вузли із заданого набору. Набір вузлів-ретрансляторів вибирається зі списку найближчих сусідів (з метрикою, тобто числом переходів, що дорівнює одиниці), таким чином, щоб об'єднане безліч їх найближчих сусідів містило всю сукупність сусідів вихідного вузла з метрикою, що дорівнює двом.

Завдяки стратегії MPR кожен вузол мережі визначає оптимальні за кількістю переходів маршрути і зберігає їх у своїй таблиці маршрутизації. Таким чином, на кожному вузлі в будь-який момент часу роботи є інформація про маршрути до кожного вузла мережі [57].

Протокол Fisheye State Routing (FSR) [58,59], розроблений Лабораторією бездротової адаптивної мобільності (WAM)[57] Каліфорнійського університету в Лос-Анджелесі. Це протокол маршрутизації на основі таблиць є адаптованим до бездротового середовища. Він забезпечує

неявну ієрархічну структуру маршрутизації. Завдяки оновленню інформації про стан каналу з різною частотою в залежності від відстані до області дії «риб'яче око».

FSR добре масштабується і зберігає низькі накладні витрати без збитку для точності обчислення маршруту. Точність маршрутизації FSR порівнянна з ідеальною схемою Link State.

Зберігаючи запис маршрутизації для кожного пункту призначення, FSR уникає додаткової роботи по «пошуку» пункту призначення (як при маршрутизації на вимогу) та, таким чином, підтримує низьку затримку передачі одиночних пакетів.

У міру збільшення мобільності маршрути до віддалених пунктів призначення стають менш точними. Однак, коли пакет наближається до місця призначення, він знаходить все більш точні маршрути по мірі того, як входить в сектори з більш високою частотою оновлення.

В результаті FSR є більш бажаним для великих мереж, де мобільність висока, а смуга пропускання мала.

Для зменшення накладних витрат на оновлення маршрутизації в великих мережах, Fisheye State Routing (FSR) для спеціальних мереж вводить поняття багаторівневої «області дії».

Вузол зберігає стан каналу для кожного пункту призначення в мережі. Він періодично передає в широкомовному режимі оновлення стану каналу призначення своїм сусідам з частотою, яка залежить від відстані переходу до цього пункту призначення (тобто «області дії» щодо цього пункту призначення). Оновлення стану, відповідним віддаленим пунктам призначення, поширюється з меншою частотою, ніж поновлення для близьких пунктів призначення. На основі оновлень стану вузли створюють карту топології всієї мережі і обчислюють ефективні маршрути.

FSR нагадує маршрутизацію станом каналу в тому, що він поширює поновлення за станом каналу. Однак поновлення поширюються як агрегати, періодично (з періодом, що залежить від відстані), а не розсилаються окремо

з кожного джерела. Це збільшує масштабованість великих мобільних однорангових мереж і зменшує накладні витрати [58].

Протоколи маршрутизації на основі розташування вузлів. Протоколи, які підпадають під цю категорію, засновані на отриманні місцезнаходження транспортних засобів з різних джерел, таких як карти, глобальні системи позиціонування (GPS) [59]. Таким чином, джерело і пункт призначення покладаються на інформацію про місцезнаходження вузлів для відправки та отримання повідомлень[60]. У цій категорії немає необхідності підтримувати інформацію про топологію, обслуговуванні і виявлення маршрутів. Отже, місце розташування і пересилання пакетів є основними полями в заголовку переданих пакетів.

Протоколи в цій категорії засновані на визначенні швидкості і напряму руху проміжних вузлів з метою отримання правильної маршрутної інформації.

Прикладами протоколів в цій категорії [611] є: протокол дистанційної маршрутизації для мобільності (DREAM); жадібна маршрутизація по периметру без збереження стану (GPSR); маршрутизація з поліпшенням надійності на основі розташування (RIPR).

В протоколі в DREAM дані GPS використовуються кожним вузлом для визначення свого місця розташування. Після визначення дані про місцезнаходження вузлів зберігаються в таблиці місць розташування. Частота оновлень і обмінів місцями розташування пов'язана зі змінами топології через мобільності вузлів. Отже, коли потрібно оновлення, кожен вузол генерує пакет розташування і розсилає його, щоб поширити інформацію про своє місцезнаходження.

Протокол DREAM заснований на двох алгоритмах. Перший алгоритм заснований на лавинній розсилці і використовується для поширення пакетів з інформацією про місцезнаходження, а другий - для поширення пакетів даних.

Протокол GPSR заснований на жадібному алгоритмі маршрутизації. Згідно протоколу вихідний вузол відправляє пакет даних безлічі проміжних

вузлів, поки не буде досягнутий пункт призначення. Крім того, цей алгоритм заснований на алгоритмі маршрутизації без збереження стану для отримання інформації про сусідів вузла на першому етапі [62].

Протокол RIPR був розроблений для вирішення проблеми збоїв декількох каналів. Цим протоколом визначаються швидкість і напрямок руху транспортного засобу. Після цього таблиця маршрутизації, що містить інформацію про положення і швидкості сусідів, підтримується кожним вузлом. Отже, на основі інформації, що зберігається в таблиці, найближчий сусід вибирається вихідним вузлом до тих пір, поки не буде досягнутий пункт призначення. Можна зробити висновок, що критерій, який використовується для вибору вузла наступного переходу, допомагає краще вибрати інші проміжні вузли, які необхідні в подальших переходах, оскільки враховуються положення і швидкості руху [63,79].

Протоколи маршрутизації на основі кластеризації. Запропоновані в [64] протоколи, представили нову категорію протоколів маршрутизації VANET, яка називається маршрутизацією на основі кластерів (CBR).

Ці протоколи засновані на поділі вузлів мережі на групи, які називаються кластерами. Таким чином, сусідні вузли утворюють кластер, при цьому один транспортний засіб вибирається в якості головного. Розмір кластера варіюється в залежності від критеріїв, які використовуються для формування кластера. Іншими словами, кількість транспортних засобів, географічне положення транспортних засобів або напрямок і швидкість руху можуть використовуватися в якості показників для поділу мережі на кластери.

Після утворення вузли кластера вибирають главу кластера, який буде відповідати за управління кластером та здійснювати обмін даними між кластерами. Отже, для пересилки даних при між кластерному зв'язку вибирається найкращий сусідній кластер.

Алгоритм маршрутизації на основі розташування з лавинною розсилкою на основі кластерів (LORA-CBF) заснований на поділі вузлів в

мережі на кластери. Після поділу у кожного кластера буде визначатися головний вузол, який відповідає за зв'язок з іншими кластерами і головними вузлами кластера. Крім того, головні вузли кластера відправляють періодичні повідомлення-маяки, також розсилаються пакети запиту розташування, які відправляються головними вузлами кластерів для збору інформації про місцезнаходження інших кластерів.

Варто згадати, що цей протокол маршрутизації є реактивним і був розроблений для сприяння контактам V2V [65].

Протоколи ширококомовної маршрутизації. Методи ширококомовної маршрутизації засновані на лавинній розсилці і вважаються традиційними методами, які використовуються для маршрутизації інформації в VANET. Ці протоколи використовуються, коли є необхідність в обміні інформацією з транспортними засобами, що перебувають за межами зони дії вихідного вузла, при обміні інформацією про дорожні умови та в надзвичайних ситуаціях.

У всіх випадках пакети відправляються і пересилаються для всіх вузлів в мережі.

Протокол BROADCASTCOMM заснований на поділі регіону на осередки. Після цього вузли осередку вибирають рефлектор (reflector) осередку. Рефлектор осередку відповідатиме за збір повідомлень від сусідів. Іншими словами, рефлектор осередку буде діяти як базова станція для всіх інших вузлів в осередку, тобто рефлектор осередку буде пересилати повідомлення іншим транспортним засобам в осередку [66,76,77].

Прикладами протоколів, які можна віднести до цієї категорії є протокол розподілу транспортних засобів (Distribute Vehicular Broadcast Protocols, DV CAST), протокол Nth-Powered P-persistent Broadcast (NPPB) і гібридний протокол поширення даних (Hybrid Data Dissemination Protocol, HYDI) [67].

Протоколи маршрутизації GeoCast. Протоколи маршрутизації, що підпадають під цю категорію, засновані на пересиланні або розповсюдженні

інформації тільки в ту область мережі, яка має відношення до інформації, що передається. Багатоадресна розсилка в цій групі протоколів використовується для пересилки пакетів в зону релевантності (ZOR) [68,75].

Труднощі з поділом мережі, які впливають на пересилання повідомлень, є основним недоліком цих протоколів.

Протокол RObust VEhicular Routing (ROVER) заснований на використанні лавинної розсилки для поширення керуючих пакетів. Цей протокол заснований на поділі мережі на зони актуальності.

Прикладами протоколів маршрутизації в цій категорії є протокол автомобільної маршрутизації RObust (ROVER), MOBICAST, Distributed Robust Geocast (DRG), доставка даних за допомогою транспортних засобів в автомобільній спеціальній мережі (VADD) і географічна маршрутизація over VANET (GROOV) [69,74].

Кожен з протоколів має свої переваги і недоліки. Узагальнений порівняльний аналіз протоколів можна знайти в роботах [70-73], в них підсумовані основні переваги та недоліки основних категорій протоколів маршрутизації.

Висновки до розділу 1

На поточний момент концепція організації ІТС має досить чіткий, сформований характер, що виражається у прийнятті глобальних стандартів і специфікацій, що описують ключові моменти реалізації.

Поширення сфери інформаційних технологій в область транспортних систем спричинила за собою народження нових прикладних завдань з розробки і реалізації сервісів для даного напрямку розвитку.

Надання безперервних сервісів для користувачів ІТС пов'язане з необхідністю подолання низки труднощів, обумовлених специфікою високо динамічних, спеціалізованих бездротових мереж, якими є мережі VANET.

Сервіси додатків VANET вкрай чутливі до затримок, що вимагає

застосування спеціальних підходів до їх реалізації.

Впровадження систем на основі спеціалізованої автомобільної мережі вимагає рішення безлічі питань, що належать до різних предметних областей. Спектр даних питань варіюється від економічних аспектів впровадження до методів і алгоритмів роботи розроблюваних додатків. У процесі вирішення цих питань, доводиться враховувати фундаментальні відмінності мереж VANET від інших, більш стабільних за своїми характеристиками мереж зв'язку з рухомими об'єктами. Серед таких відмінностей варто виділити:

- стрімка зміна щільності і складу мережі, що призводить до частоті зміни топології і сильної фрагментації;
- висока щільність вузлів, у сукупності з можливістю зміни рівня потужності сигналу, який передається, тягне за собою високий рівень інтерференції;
- низька передбачуваність мережевої структури у зв'язку з можливістю зміни складу мережі в якості реакції на ДТП.

Зазначені особливості мереж VANET викликають складності при реалізації пріоритетного сервісу, який полягає в надійному і своєчасному інформуванні учасників дорожнього руху про небезпеку. Беручи до уваги режими роботи мереж VANET, а також доступні протоколи маршрутизації, описані в розділі, можна сформулювати основні завдання досліджень, проведених в даній дисертаційній роботі. До них відносяться:

- 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.

Незважаючи на велику кількість досліджень в області протоколів маршрутизації VANET, проблема оцінки якості та стійкості роботи заснованих на цих протоколах систем є актуальною і на сьогоднішній день.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕРЕЖ VANET

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).

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

Для вирішення цих завдань в більшості випадків необхідно мати математичну модель мережі автомобільного транспорту. Вирішенню цього завдання присвячений цей розділ.

2.1 Основні характеристики мереж автомобільного транспорту

Кожен тип бездротових мереж має індивідуальний набір характеристик. Специфіка мереж VANET, обумовлена високою динамікою зміни їх складу і структури. Проте, можна виділити ряд ключових характеристик такого типу мереж.

Визначимо такі параметри, які є основними для мереж VANET:

– V - швидкість передачі даних по каналах зв'язку. Цей параметр в першу чергу визначається бітовою швидкістю каналу. Передбачається, що мережі VANET будуть складатися з однотипних пристроїв, тому для всіх каналів зв'язку бітова швидкість передачі буде однією і тією ж. Проте, реальна швидкість передачі буде нижче бітової, і для кожного каналу різна.

Це пов'язано з помилками при передачі даних по радіоканалу, а також з особливостями використання загального для декількох пристроїв середовища передачі даних.

- N - кількість вузлів в мережі.
- *Топологія мережі*. Фактично визначається наявністю або відсутністю радіоканалу між будь-якими двома учасниками дорожнього руху, або вузлами придорожньої інфраструктури.
- *Density* - середня кількість «сусідів» вузла мережі. Цей параметр повністю визначається поточною топологією, однак може використовуватися для комплексної оцінки мережі.
- *Diameter* - мінімальна кількість ретрансляції для передачі даних між двома найбільш віддаленими вузлами мережі. Також, як і *Density* цей параметр повністю визначається топологією і може використовуватися для комплексної оцінки мережі за допомогою єдиного параметра.
- Періодичність появи корисних даних.
- Алгоритми, які керують мережевими вузлами.

Основними параметрами, що визначають ефективність роботи мережі VANET, є:

τ_{ij} - затримка при передачі інформації від вузла i до вузла j . Цей параметр визначається відстанню між пристроями, особливостями середовища передачі (наявність перешкод), а також особливостями каналного і фізичного рівнів передачі даних. Таким чином, дана затримка складається з часу для подолання радіохвилями відстані між пристроями з урахуванням особливостей середовища, і часу, який потрібен каналному рівню, щоб почати передачу.

c_{ij} - пропускна здатність каналу між вузлом i і вузлом j - кількість інформації, що проходить через канал за одиницю часу. Цей параметр визначається швидкістю передачі даних, а також колізіями каналного рівня і

помилками при передачі.

Джиттер затримки - перша похідна затримки проходження даних за часуом. Цей параметр важливий для деяких додатків.

Робота бездротової мережі повністю залежить від наступних складових:

- Поведінки кожного окремо взятого пристрою.
- Положення кожного пристрою в просторі.
- Середовища передачі даних.
- Періодичності появи подій, на які мережа повинна реагувати.

2.2 Математична модель мережі автомобільного транспорту

Модель топології мережі VANET. Топологія є однією з основних характеристик мереж VANET. Від того, як пов'язані між собою пристрої, і як вони можуть взаємодіяти, безпосередньо залежать всі параметри роботи мережі, в тому числі якість обслуговування. Для моделювання топології мережі VANET розроблена модель вузла і модель каналу. У свою чергу модель вузла ділиться на модель пристрою і модель стану пристрою, а модель каналу на модель радіопокриття і модель стану каналу.

Модель пристрою. Кожен вузол мережі являє собою відносно складний електронний прилад. Він має одне або кілька вбудованих пристроїв обробки інформації, радіопередавач і радіоприймач з певними характеристиками. Для управління окремим вузлом мережі VANET використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Однак з точки зору топології внутрішній зміст пристрою є несуттєвим - кожен вузол представляється як джерело електромагнітного випромінювання. Кожен окремо взятий вузол будемо вважати точкою на площині.

Таким чином, йому буде відповідати наступний набір характеристик:

- (x, y) - просторові координати.

- AF - прапор активності.

Для спрощення будемо вважати, що розглянута система має обмеження в просторі:

$$|x| \leq r_1, \quad |y| \leq r_2 \quad (2.1)$$

В процесі моделювання координатам відповідають випадкові величини, що мають рівномірний розподіл і задовольняють (2.1).

Модель радіопокриття. Для передачі даних бездротові пристрої, як правило, використовують електромагнітні радіохвилі. Поширення радіохвиль в вакуумі описується наступним чином [17]:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (2.2)$$

де $P_R(d)$ – потужність прийнятого сигналу,

d - відстань між передавачем і приймачем,

G_T – коефіцієнт ефективності антени передавача,

G_R – коефіцієнт ефективності антени приймача.

λ - довжина хвилі,

L - коефіцієнт втрати.

Будемо враховувати, що середовище передачі може бути неоднорідним. Під впливом такого середовища виникають неоднорідності інтенсивності сигналу. Таким чином, модель інтенсивності радіосигналу буде виглядати наступним чином:

$$G_{dB}(d) = G_{dB}(d_0) + X_{dB} \quad (2.3)$$

де $G_{dB}(d)$ - відносна інтенсивність радіосигналу,

$G_{dB}(d_0)$ – відносна інтенсивність радіосигналу для випадку поширення радіохвиль в вакуумі,

X_{dB} – випадкова величина, отримана за допомогою розподілу Гаусса з $\mu=0$ та δ_{dB} - коефіцієнт загасання для конкретного середовища.

Таким чином, топологія мережі VANET залежить від безлічі факторів навколишнього середовища: наявність перешкод на шляху радіохвиль, характер і форма таких перешкод, коефіцієнт загасання для середовища передачі, характер перешкод, і багато інших [80]. У зв'язку з цим була прийнята спрощена модель радіопокриття.

Будемо вважати, що між вузлами s_{n_1} та s_{n_2} з координатами $\{x_1, y_1\}$ і $\{x_2, y_2\}$ існує прямий зв'язок в тому і тільки в тому випадку, якщо відстань між ними менше значення d - відстані дії передавача. Таким чином, загальна модель мережі виглядає наступним чином:

$G = (S, E)$ — зв'язний неорієнтований граф зі зваженими ребрами.

S - безліч пристроїв мережі VANET, вони представлені вершинами графа.

E - безліч каналів зв'язку, представлені ребрами графа.

$B \in S$ - базова станція.

Ваги ребер графа представляють метрики відповідних каналів. Як правило, метрики визначаються налаштуваннями пристроїв і логікою роботи мережевих протоколів. З цієї причини правила призначення ваг в моделі топології не розглядаються.

Прийнята загальна модель топології дозволяє не враховувати просторові координати вузлів. Це дозволяє в якості основного інструменту моделювання розглянутих мереж використовувати теорію графів.

Модель стану пристрою. Кожен вузол мережі VANET є автономним

обчислювальним пристроєм. Під впливом зовнішніх факторів, внутрішніх помилок, напрямку і швидкості руху вузол може в будь-який момент втратити працездатність (вийти з зони дії мережі), що в свою чергу може вплинути на роботу всієї мережі. Наприклад, можливі втрати пакетів, які очікують у черзі на відправку, а при виході з мережі лідера кластера будуть проведені перевибори, що потребує деякого часу, протягом якого відправка будь-яких даних може стати неможливою.

Для моделювання топології мережі в кожному момент часу, необхідно моделювати час "життя" кожного пристрою мережі.

Для моделювання часу роботи до відмови технічних пристроїв можуть використовуватися експоненціальний розподіл, усічений нормальний розподіл, розподіл Релея, розподіл Вейбулла, трикутний розподіл або сума (суперпозиція) розподілів.

Однак найчастіше застосовується експоненціальний (показовий) розподіл, так як він є типовим для складних об'єктів, що складаються з багатьох елементів з різними розподілами [81].

Визначимо час «життя» автономного пристрою VANET мережі за допомогою експоненціального розподілу зі щільністю:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

В цьому випадку $\frac{1}{\lambda}$ середня тривалість «життя» пристрою в мережі.

Модель стану каналу. Помилки на каналі залишаються суттєвим фактором, що впливає на ефективність роботи каналу зв'язку. Це відбувається через різні перешкоди. Велика частина таких перешкод відсіюється при виділенні корисного цифрового сигналу з несучою.

Імовірність виникнення помилки визначається, як величина BER (Bit Error Rate). Ця величина обчислюється, як відношення кількості помилкових

бітів до загальної кількості переданих бітів.

Під впливом перешкод і зовнішніх чинників зв'язок між пристроями може бути тимчасово втрачено, що є критичним для забезпечення безпеки руху. В цьому випадку можна вважати, що канал зв'язку між пристроями повністю відсутній. Для моделювання стану каналу була використана проста Марковська модель з двома станами.

Втрата зв'язку між пристроями, також як і її відновлення, може відбуватися під впливом безлічі чинників, що мають різні розподіли періодів. Таким чином, відмова каналу радіозв'язку будемо розглядати як відмову складної системи, компонентами якої є як радіо передавальні пристрої, так і природні елементи середовища передачі даних (перешкоди, неоднорідності середовища, джерела перешкод та ін.).

Час безвідмовної роботи в такому випадку буде підкорятися експоненціального розподілу [81].

Таким чином, будемо вважати, що тривалість ON і OFF періодів підкоряються закону експоненціального розподілу:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

із середньою тривалістю $\frac{1}{\lambda}$ наявності або відсутності радіоканалу.

Модель джерела трафіку. За допомогою аналізу процесів, що відбуваються в мережі VANET, може бути створена математична модель джерела трафіку, яку можна верифікувати шляхом порівняння математичної моделі з результатами вимірювань трафіку реального або змодельованого вузла.

Одна з проблем аналізу трафіку VANET полягає в тому, що характеристики трафіку в таких мережах значною мірою залежать від роботи дорожньої інфраструктури або сценарію роботи мережі.

Якщо говорити про трафік, генерований окремими вузлами (без урахування транзитного трафіку), то все розмаїття сценаріїв роботи мережі VANET можна розділити на три типи: періодична відправка даних, відправка даних за запитом (on demand) і керована подіями відправка даних (event-driven).

Періодична відправка даних, як видно з назви, являє собою регулярну, через рівні інтервали часу відправлення вузлом зібраної ним інформації (наприклад даних про своє місцезнаходження для OBU). Протоколи прикладного рівня вузла при цьому створені таким чином, що ніякі зовнішні події, крім виключення вузла, не можуть вплинути на таку періодичну відправку даних. Практично всі програми телеметрії, моніторингу навколишнього середовища і дорожньої обстановки найчастіше працюють саме за цим сценарієм.

Всі джерела з періодичною відправкою даних можна розділити на джерело випадкових даних з безперервним контролем і джерело випадкових даних з періодичним контролем.

Джерело випадкових даних з безперервним контролем. Таке джерело можна використовувати для систем, де дані виникають лише у разі зміни стану контрольованої системи (наприклад зміни дорожньої обстановки в результаті дорожньо-транспортної пригоди, виникнення несправностей і поломок в автомобілі).

Станом системи будемо вважати сукупність деяких параметрів $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$ наприклад температура двигуна, відстань до найближчого світлофора, наявність дорожніх знаків, завантаженість траси та ін. Стан системи контролюється за допомогою спеціалізованих датчиків і обробляється деяким модулем. Прикладом такого джерела даних є телекомунікаційні модулі OBU, які встановлюються на автомобілі, а також інфраструктурні базові станції RSU.

Такі джерела мають деякі особливості, що визначають закономірності

формування даних. Першою особливістю є неможливість виявлення змін контрольованих величин менше деякого значення Δ_v - кроку вимірювання, що визначається як датчиком, так і електронним модулем.

Другою особливістю є неможливість безперервного спостереження за контрольованим параметром - будь-яка вимірювальна система має час реакції на зміну параметра - Δ_t .

Таким чином, модель джерела даних буде визначатися таким чином:

T -період появи даних.

$$T = \begin{cases} X & X > \Delta_t \\ \Delta_t & X < \Delta_t \end{cases}$$

X - випадкова величина, розподілена за експоненціальним законом з $\lambda = \frac{1}{T_m}$

T_m - середнє значення періоду появи нових даних.

Δ_t - час реакції на зміну параметра.

S_{ud} - обсяг переданих даних.

Джерело даних з періодичним контролем. Таке джерело можна використовувати для систем з фіксованим мінімальним часом реакції на зміну контрольованого параметра. У цьому випадку значення параметра зміниться через деякий період часу Δ_t .

Модель джерела даних буде визначатися таким чином:

T - період появи даних.

$$T = \Delta_t \left(\left\lceil \frac{X}{\Delta_t} \right\rceil + 1 \right) \quad (2.6)$$

де X - випадкова величина, розподілена за експоненціальним законом з

$$\lambda = \frac{1}{T_m}$$

T_m - середнє значення періоду зміни контрольованого параметра.

Δ_t - час між двома послідовними вимірами контрольованого параметра.

S_{ud} - обсяг переданих даних.

Передача даних за запитом передбачає, що вузол не є ініціатором передачі даних і може самостійно передавати лише транзитні дані від інших вузлів і службову інформацію. У той же час, деяким головним вузлом, пристроєм обробки даних (главою кластера) можуть відходити запити, і тільки в цьому випадку вузол ініціює відправку власних даних. У деяких випадках, коли постійне отримання інформації від всіх вузлів мережі не є критичним, такий підхід дозволяє ефективніше використовувати ресурси.

Третій тип, керована подіями відправка даних, мається на увазі, що дані відправляються з ініціативи вузла, але тільки в тому випадку, якщо ці дані є в наявності, або досягли якихось граничних показників.

Висновки до розділу 2

В даному розділі розроблені математичні моделі для мереж автомобільного транспорту, а також перераховані основні параметри мережі, що впливають на її поведінку і продуктивність. Розроблена модель топології дозволяє моделювати структуру розглянутих мереж, яка постійно змінюється. Запропоновані моделі мережевого навантаження дозволяють моделювати трафік мереж автомобільного транспорту. Для моделювання трафіку розглянуті стандартні моделі мережевого навантаження. У наступних розділах запропоновані математичні моделі будуть використані для імітаційного моделювання мереж VANET.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОКОЛУ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Рішенням, здатним забезпечити зв'язок між транспортними засобами, є розгортання спеціальної автомобільної мережі (VANET) [57]. Для мереж VANET характерно те, що вони створюються де завгодно, тому що вони в меншій мірі залежать від фіксованої інфраструктури (яка зазвичай створюється через розгортання точок доступу або базових станцій) [58].

У мережах VANET за передачу радіосигналу відповідають On Board Unit (OBU) - бортові одиниці в основному невеликі, портативні. Оскільки досяжність радіосигналів обмежена, кожен вузол може безпосередньо зв'язуватися тільки з іншими вузлами, які знаходяться в межах зони їх передачі сигналу. Однак вузлу може знадобитися передати інформацію іншим вузлам, які знаходяться за межами цієї зони.

З цієї причини вузли повинні взаємодіяти між собою, діючи як маршрутизатори, пересилаючи інформацію від вихідного вузла до вузла призначення [59].

VANET, як окремий випадок мобільних однорангових мереж, також характеризуються високою мобільністю вузлів (транспортних засобів), нерівномірним розподілом транспортних засобів та обмеженим зв'язком між вузлами через обмеження, що накладаються топологією автомагістралей і / або міських доріг.

У VANET, як і в більшості мереж, за зв'язок між вузлами повинні відповідати моделі взаємодії відкритих систем (OSI). Такий стандарт розділений на сім рівнів, які визначають загальні принципи роботи мережі. В автомобільних мережах найбільшу кількість стандартів мають фізичний, каналний і мережевий рівні.

Що стосується фізичного рівня і рівня каналу передачі даних, радіочастотний зв'язок повинен використовувати стандарт виділеного зв'язку ближньої дії (DSRC) [5], що працює на частоті 5,9 ГГц. Схема бездротового

доступу в транспортних засобах (WAVE) [26], розроблена Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), повинна працювати в смузі частот, визначеної DSRC. WAVE визначає нове сімейство з чотирьох протоколів, призначених для зв'язку між транспортними засобами, під назвою IEEE 1609 (IEEE 1609.1, IEEE 1609.2, IEEE 1609.3 і IEEE 1609.4). IEEE 1609.3, наприклад, визначає протоколи мережевого рівня.

WAVE побудований з урахуванням специфікацій американського DSRC, розділяючи частотний спектр на сім каналів по 10 МГц кожна. Оскільки шаблон розробляється для мереж VANET, він повинен враховувати швидкість вузла, радіус передачі сигналу і швидкість передачі даних. Таким чином, можна виділити наступні характеристики: швидкість вузлів до 190 км / год, радіус передачі до 1 км (при відсутності перешкод) і швидкість передачі від 6 до 27 Мбіт/с. WAVE також визначає MAC рівень OBU, який підтримує високу швидкість переміщення вузлів і підтримує мінімальну затримку. Отже, рівень MAC повинен відповідати адаптації рівня MAC IEEE 802.11e.

Мережевий рівень, серед іншого, відповідає за визначення правил маршрутизації пакетів. Процес маршрутизації пакетів - це служба, що відповідає за виявлення і збереження маршрутів між вихідними і кінцевими вузлами, а протоколи маршрутизації управляють такою службою. Протоколи маршрутизації можна класифікувати за такими параметрами: типом архітектури та режимом роботи. Режим роботи охоплює тип маршрутизації і може бути розділений на топологічну, географічну, гнучку і поширювальну.

Для оцінки продуктивності протоколів маршрутизації для мереж автомобільного транспорту як правило використовуються особливі методи [5]. Для мережі, яка використовує досліджуваний протокол маршрутизації, розробляється сценарій її роботи. Такий сценарій включає в себе елементи мережевої топології, такі як розташування джерел трафіку, а також вибір вузлів - кінцевих приймачів трафіку.

3.1 Модифікований протокол маршрутизації FSR

Одним з основних факторів, що впливають на ефективність протоколу маршрутизації, є спосіб поширення та оновлення інформації про вузли та канали зв'язку між ними.

У класичних мережах, що використовують широкосмугові канали передачі, маршрутна інформація оновлюється кожного разу, коли відбуваються зміни топології мережі. При цьому зазвичай використовується широкомовлення пакетів з оновленнями. Бездротові мережі складаються з великої кількості пристроїв і каналів зв'язку, причому можливості каналів зв'язку як правило досить обмежені.

Тому використання широкомовної розсилки інформації про оновлення неможливе, так як в цьому випадку службовий трафік буде переважати над корисним трафіком.

Для вирішення даної проблеми різними науковими школами було розроблено кілька рішень: TBRPF [82, 83], FSR [84], OLSR [85], HSLS [86]. Кожне з цих рішень дозволяє значно зменшити накладні витрати при доставці маршрутної інформації. Більш докладно протоколи маршрутизації, які використовуються в мережах VANET розглядалися в першому розділі.

При цьому для пошуку маршруту може використовуватися один з класичних алгоритмів пошуку найкоротшого шляху.

Одним з рішень, що дозволяє розділити мережу на "зони видимості", є FSR (Fisheye State Routing). Такий поділ дозволяє відмовитися від доставки маршрутної інформації до вузлів, які з великою ймовірністю цього не потребують.

Цим можна забезпечити зменшення службового трафіку до 80% [84]. Для мереж автомобільного транспорту пропонується модифікувати протокол FSR. Модифікований протокол, який будемо називати FSRM (Fisheye State Routing Modified), буде використовувати власний алгоритм визначення областей видимості.

Кожен вузол OBU_i формує дві таблиці і один список:

- список сусідів $neighbou_i$;
- таблиця топології $topology_i$;
- таблиця найближчих ретрансляторів $repeater_i$.

У списку сусідів $neighbou_i$ зберігаються безпосередні «сусіди» вузла OBU_i . Для кожного вузла OBU_i міститься запис в таблиці $topology_i$. Кожен запис ділиться на дві частини: $topology.chan_j$ та $topology.time_j$. $topology.chan_j$ містить інформацію про стан каналів, отриману від вузла OBU_i , а $topology.time_j$ містить час генерації інформації про стан каналів вузлом OBU_i .

На відміну від протоколу FSR, де таблиця $NEXT_i(j)$ містить найближчі ретранслятори для всіх вузлів, пропонований протокол зберігає в таблиці $NEXT_i(p)$ інформацію про найближчий ретранслятор до базової станції (RSU) для пакета з внутрішнім пріоритетом p .

У разі використання класичного алгоритму пошуку найкоротшого шляху в цій таблиці міститься всього один запис, так як в цьому випадку поняття пріоритету відсутнє. Пропонований протокол використовує наступний принцип визначення областей видимості:

Для кожного вузла визначається зоновий коефіцієнт:

$$k_i(j) = H_j + H_{ij} - H_i$$

де, H_j - мінімальна кількість ретрансляції (хопов) від вузла OBU_j до базової станції.

H_{ij} - мінімальна кількість ретрансляцій від вузла OBU_i до OBU_j

H_i - мінімальна кількість ретрансляцій від вузла OBU_i до базової станції.

Відповідно до значення $k_i(j)$ для кожного вузла визначається його зона

(рис. 3.1).

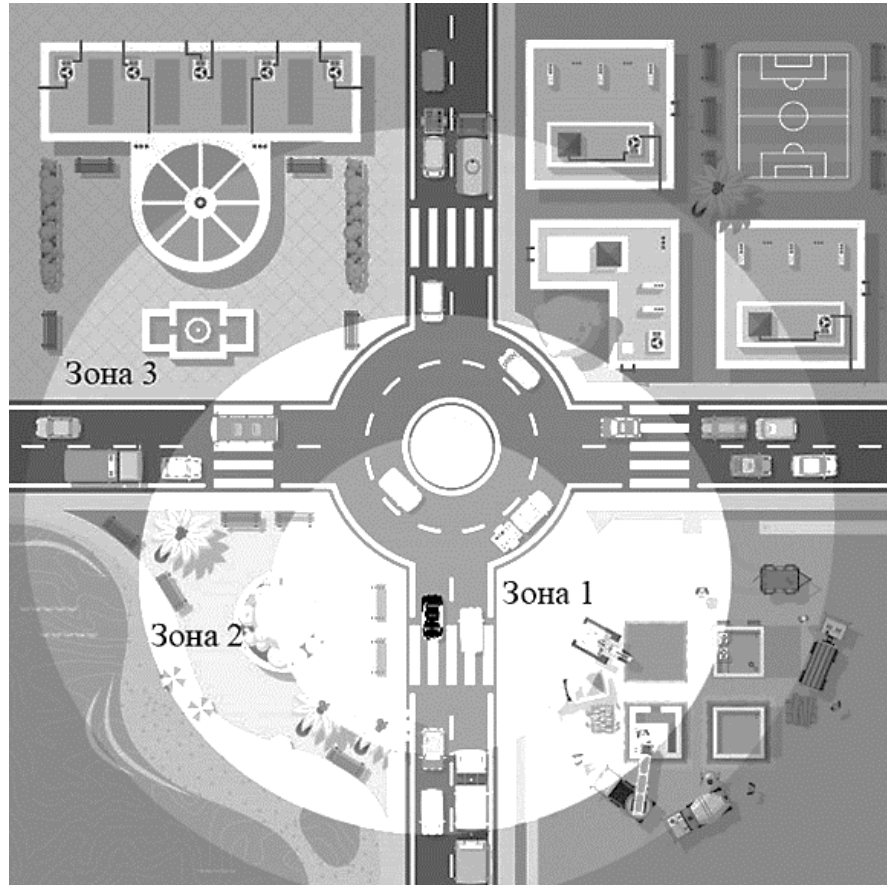


Рисунок 3.1 - Области видимості протоколу FSRM

Таких зон може бути кілька:

- вузли з $k_i(j) < h_1$ можна визначити як першу зону;
- вузли, що знаходяться в інтервалі $h_1 < k_i(j) < h_2$ можна визначити

як другу зону;

- інші вузли будуть належати до третьої зони.

Для кожної зони визначається період оновлення інформації про маршрути. Так, якщо інформація, про вузли з 1-ї зони поширюється з

періодом T_1 , інформація 2-ї зони буде поширюватися з періодом T_2 , а 3-ї зони - T_3 . За умови, що $T_1 < T_2 < T_3$ інформація отримана від транспортного засобу, який знаходиться на більшій відстані від OBU буде оновлюватися рідше.

Для знаходження коефіцієнта $k_i(j)$ необхідно організувати допоміжну таблицю. У цій таблиці для кожного вузла j зберігається два значення H_j та H_{ij} . Значення для такої таблиці можуть бути отримані в процесі роботи як алгоритму Дійкстри, який використовується для пошуку оптимального шляху, так і за допомогою інших алгоритмів (Флойда-Уоршелла, Форда-Беллмана та ін.).

Таким чином, кожен вузол OBU буде своєчасно отримувати інформацію про потенційні ретранслятори для своїх пакетів, а несвоєчасне отримання інформації про інші вузли не матиме серйозного впливу на продуктивність мережі. При цьому буде досягнуто значне зменшення накладних витрат на доставку маршрутної інформації.

3.2 Критерії оцінки якості передачі даних для мереж VANET

Оцінка якості в мережах, зазвичай робиться на трьох рівнях:

- на рівні користувача оцінюються показники суб'єктивної думки людини, наприклад суб'єктивна оцінка якості сприйняття окремих видів інформації;
- на рівні послуг оцінюються різні аспекти якості послуги, такі як швидкість передачі даних, механізми кодування і таке інше;
- на транспортному рівні оцінюється якість функціонування мережі: затримка, втрата пакетів, варіація затримки та ін.

На кожному рівні визначені відповідні параметри оцінки якості:

- показники якості сприйняття (Quality of Experience, QoE) на рівні користувача;
- показники якості обслуговування (Quality of Service, QoS) на рівні послуг;
- показники якості функціонування мережі (Network Performance, NP) на транспортному рівні.

На рис.3.2 показана трирівнева модель оцінки якості і відповідні параметри оцінки.

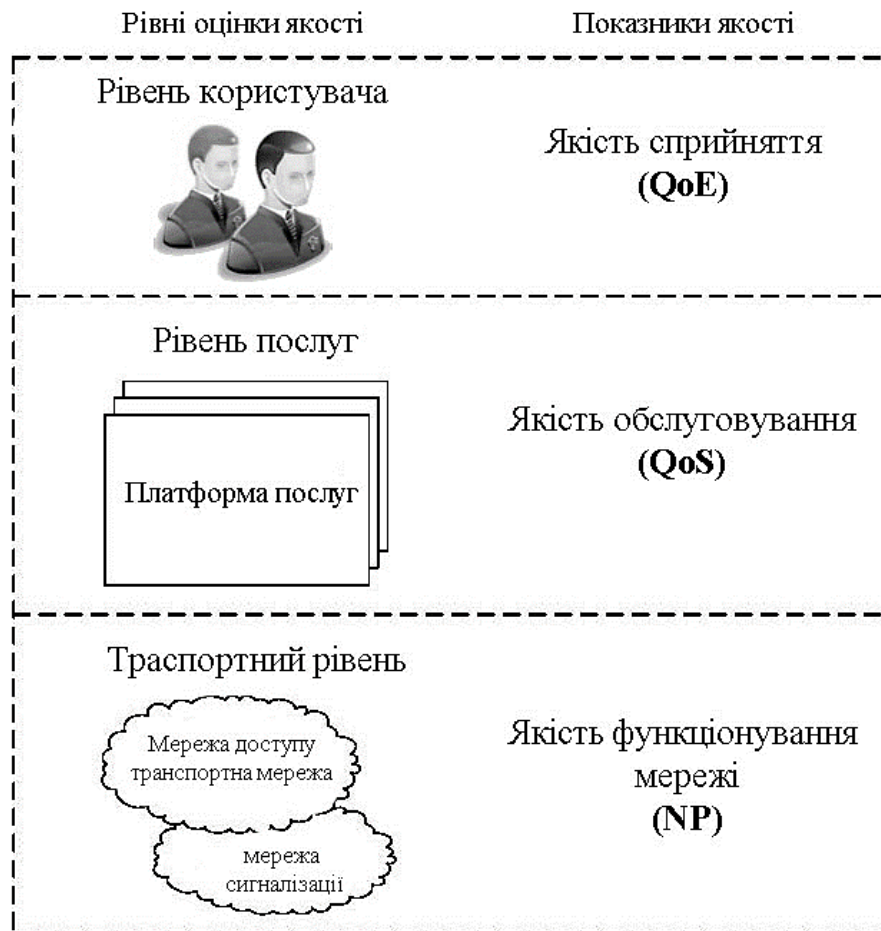


Рисунок 3.2 - Трирівнева модель оцінки якості

Ці параметри дозволяють оцінити якість мережі загального призначення для клієнта деякого вузла, однак не дозволяють провести комплексну оцінку якості мережі. Бездротові спеціалізовані мережі

автомобільного транспорту складаються з відносно великої кількості вузлів і каналів зв'язку, і при цьому в загальному випадку не є мережами загального призначення.

Таким чином, ефективність мережі VANET неможливо оцінити лише за допомогою показників якості для одиночного каналу або клієнта вузла. Для оцінки продуктивності протоколів маршрутизації для бездротових MANET мереж, як правило, використовуються особливі методи [87] [88, 89] .

Для мережі, яка використовує досліджуваний протокол маршрутизації, розробляється сценарій її роботи. Такий сценарій включає в себе елементи мережевої топології, такі як розташування джерел трафіку, а також вибір вузлів – проміжних та кінцевих приймачів трафіку.

Адекватність розробленого сценарію перевіряється шляхом аналізу розподілу довжини маршруту між джерелом і приймачем [87].

Для оцінки продуктивності протоколів використовуються наступні характеристики:

- Коефіцієнт доставки пакетів - відношення кількості доставлених пакетів до кількості відправлених. Такий коефіцієнт використовується для оцінки втрат пакетів, дозволяючи оцінити максимальну пропускну здатність мережі. При оцінці протоколу маршрутизації це значення дозволяє оцінити його завершеність і коректність [87].

- Накладні витрати при маршрутизації. Тут величиною, що оцінюється, є загальна кількість службових пакетів, згенерованих протоколом маршрутизації за час моделювання. Такий параметр дозволяє оцінити масштабованість протоколу маршрутизації, його ефективність для роботи в мережах з вузько смуговими каналами.

- Оптимальність знайденого шляху. В цьому випадку для оцінки протоколу використовується різниця між довжиною знайденого і оптимального маршрутів. Такий параметр дозволяє оцінити, наскільки протокол ефективно використовує ресурси мережі [87].

- Середня затримка передачі пакета. Включає в себе всі можливі затримки, такі як очікування в чергах, затримки на каналному рівні та ін. Такий параметр може служити для оцінки ефективності протоколу при передачі best-effort трафіку [88].

Описані методи оцінки продуктивності не дозволяють комплексно оцінити якість передачі даних для досліджуваного протоколу. Це пов'язано з тим, що:

- для оцінки використовується кілька приватних значень, без об'єднання їх в єдиний комплексний критерій;
- сценарій роботи мережі погано формалізується і потребує індивідуальної реалізації в кожному конкретному випадку.

Однак той факт, що призначення і умови роботи такої мережі відомі ще під час її проектування, а область застосування заздалегідь визначена, робить можливим розробку комплексних критеріїв оцінки якості передачі даних, орієнтованих на спеціалізовану мережу VANET.

Таким чином, було запропоновано три типових критерія оцінки якості передачі даних для мереж автомобільного транспорту.

Такими критеріями пропонується визначити:

1. Коефіцієнт максимальної втрати пакетів:

$$\max_{i=1} \frac{L_i}{S_i} \rightarrow \min$$

де L_i - кількість втрачених пакетів, відправлених вузлом i . Під втраченим пакетом розуміється будь-який пакет не доставлений вчасно.

Таким чином, для VANET має бути визначено максимальний час доставки пакета, після закінчення якого дані втрачають свою актуальність у зв'язку зі зміною дорожньої ситуації.

S_i - кількість пакетів, відправлених вузлом i .

При передачі мультимедійного трафіку втрата пакетів буде сприйматися як перешкоди і паузи. Однак у багатьох випадках подібні ситуації можуть допускатися, і не будуть мати критичне значення для вирішення поставленого завдання. Таким чином, критерій буде визначати реальний рівень якості обслуговування для досліджуваної мережі.

2. Коефіцієнт максимального часу доставки:

$$\max_{i=1,\dots,N} (T_{i \rightarrow b}(t)) \rightarrow \min$$

$(T_{i \rightarrow b}(t))$ - час передачі пакета від вузла i до придорожньої одиниці RSU
- b в момент часу t .

T -кількість вузлів мережі.

Такий критерій актуальний для VANET, як для системи реального часу (наприклад, OBU визначає положення автомобіля в просторі і розсилає цю інформацію сусіднім транспортним засобам).

Багато підсистем мережі автотранспорту вимагає необхідний рівень якості зв'язку для кожного вузла, причому неприпустимо навіть короткочасне погіршення якості зв'язку. Основною і головною особливістю таких систем є вимога по швидкості реакції на зміну параметрів системи.

Як правило, мережі VANET, більшу частину часу мають середню або мінімальну завантаженість. Однак такі мережі повинні бути готові до лавиноподібних навантажень, забезпечуючи стабільну доставку даних в будь-який момент часу.

3. Коефіцієнт середнього часу доставки:

$$\max_{i=1,\dots,N} (M(T_{i \rightarrow b})) \rightarrow \min$$

$M(T_{i \rightarrow b})$ - математичне очікування часу передачі пакету від вузла i до RSU - b .

Час передачі пакета включає в себе час безпосередньої передачі, а також всі затримки, такі як час ініціалізації передачі канальним рівнем, очікування в чергах вузлів-маршрутизаторів та ретрансляторів та інші. Цей критерій повинен враховувати тільки успішно доставлені пакети.

Основу методики оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для мереж VANET становить метод комплексної оцінки якості передачі даних. Імітаційна модель дозволить отримати значення критеріїв якості передачі даних, які будуть в подальшому використовуватися для оцінки продуктивності досліджуваної мережі.

3.3 Методика оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для спеціалізованих мереж VANET

Бездротова мережа чутлива до зміни наступних параметрів її роботи:

- період появи нових даних – T ;
- обсяг даних, що доставляються - S_{in} ;
- кількість пристроїв в мережі – N ;
- діаметр мережі – D ;
- щільність мережі - $Dens$.

Дослідження якості мереж, що використовують різні протоколи маршрутизації, можуть проводитися при зміні таких параметрів:

1. Період появи нових даних - T .

$$a \leq T \leq b$$

Таке дослідження необхідно в тому випадку, якщо контрольований параметр мережі VANET схильний до флуктуацій і не може бути достовірно прогнозований.

2. Обсяг даних, які підлягають доставці- S_{in} .

$$a \leq S_{in} \leq b$$

Це дослідження необхідно для підсистем VANET, що володіють відносною універсальністю, де характер даних не може бути заздалегідь визначений.

3. Кількість пристроїв і діаметр мережі при незмінній щільності.

$$a \leq N \leq b$$

$$Diametr(a) \leq D \leq Diametr(b)$$

Таке дослідження необхідне в тому випадку, якщо в мережі застосовуються протоколи певного класу, наприклад пропонований протокол маршрутизації FSRM.

4. Кількість пристроїв і щільність мережі при незмінному діаметрі.

$$a \leq N \leq b$$

$$Dens(a) \leq Dens \leq Dens(b)$$

Це дослідження необхідно для систем, які не мають фіксованої достовірності вимірювань. Наприклад, на достовірність інформації про місцезнаходження OBU впливає безліч факторів.

5. Щільність мережі - $Dens$.

Таке дослідження необхідно для мереж VANET у зв'язку з тим, що мережі такого класу мають високу мобільність.

Основу методики оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для бездротових спеціалізованих мереж становить метод комплексної оцінки якості передачі даних.

Запропонований метод передбачає використання імітаційної моделі досліджуваної мережі, а також критеріїв якості передачі даних.

Імітаційна модель дозволяє отримати значення критеріїв якості передачі даних, які будуть в подальшому використовуватися для оцінки якості досліджуваної мережі.

Таким чином, запропонована методика полягає в наступному:

1. Вибір критерію якості.
2. Визначення основних характеристик мережі: кількість OBU та RSU, бітова швидкість передачі, і інші. Ці характеристики необхідні для імітаційного моделювання мережі, що розглядається.
3. Вибір моделі джерела корисних даних. Для цього аналізуються умови роботи мережі (стан дорожньої інфраструктури). Для конкретної мережі необхідна програмна реалізація джерела даних.
4. Програмна реалізація протоколу, що досліджується. Протокол повинен бути реалізований відповідно до використовуваної потокової моделі.
5. Дослідження мережі відповідно до обраних параметрів.
6. Порівняння протоколів за результатами імітаційного моделювання на основі обраного критерію оцінки.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі висвітлено основні характеристики та тенденції, що стосуються маршрутизації в мережах автомобільного транспорту.

Були запропоновані критерії комплексної оцінки якості передачі даних в мережах автомобільного транспорту.

Запропоновано методику оцінки та порівняння протоколів маршрутизації для мереж VANET. Основу методики оцінки і порівняння протоколів маршрутизації для мереж автомобільного транспорту становить метод комплексної оцінки якості передачі даних.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Одним з важливих аспектів імітаційного моделювання систем ІТС є реакція транспортного засобу на інформацію, отриману від додатків ІТС. Реакція водіїв (транспортних засобів) в різних ситуаціях може вплинути на трафік. Наприклад, водій (транспортний засіб), який отримав попередження про зіткнення, може або почати гальмувати, або з'їхати з шосе, в залежності від відстані до місця події і наявності з'їздів.

Програмне забезпечення, що дозволяє дослідити поведінку транспортних засобів (в залежності від конкретного контексту програми), називається інтегрованою каркасною платформою або просто симулятором VANET.

4.1 Аналіз існуючих систем імітаційного моделювання VANET

В даний час відомо кілька інтегрованих програмних комплексів, які об'єднують як модуль мережевого симулювання, так і блок симуляції VANET. У більшості випадків ці модулі представляють собою два різних додатки. Тому існує явна потреба в інтегрованому VANET і мережевому симуляторі для оцінки ефективності систем ІТС. Нижче розглядаються дані симулятори.

TraNS (середовище моделювання VANET та мережевого моделювання) [6] являє собою середовище моделювання, яке об'єднує як генератор мобільності, так і мережевий симулятор, і надає інструмент для створення реалістичних VANET-симуляцій. *TraNS* забезпечує зворотний зв'язок між поведінкою транспортного засобу і моделлю мобільності. Наприклад, коли транспортний засіб передає інформацію, що повідомляє про нещасний випадок, поведінка сусідніх транспортних засобів може змінюватися.

TraNS - це відкритий проект з відкритим вихідним кодом, що забезпечує орієнтовану на додатки платформу оцінки для VANET.

TraNS написаний на Java і C ++, і працює під Linux і Windows (режим генерації трасування). Поточна реалізація TraNS використовує симулятор трафіку SUMO і симулятор мережі Ns-2. Проект створений і підтримується компанією в EPFL, Швейцарія.

Остання версія TraNS має кілька функцій, в тому числі:

- підтримку протоколу 802.11p;
- автоматичне створення дорожніх мереж з карт TIGER і Shapefile;
- автоматичне створення випадкових маршрутів транспортних засобів;
- генерація трасування мобільності для NS-2, SUMO і NS-2 через TraCI інтерфейс;

- можливість імітувати події дорожнього руху, наприклад, аварії.

Крім того, він надає дві готові до використання програми VANET:

- попередження про дорожні небезпеки (безпека);
- динамічне перенаправлення транспортних засобів (ефективність трафіку).

TraNS може імітувати великомасштабні мережі (перевірено до 3000 автомобілів) і дозволяє візуалізувати моделювання за допомогою Google Earth (в даний час працює тільки для файлів TIGER).

GrooveNet [90] являє собою гібридний симулятор, який забезпечує зв'язок між імітованими автомобілями і реальними транспортними засобами. Шляхом моделювання міжмодульних комунікацій на реальній топографічній карті, система GrooveNet спрощує розробку і моделювання протоколів VANET. Модульна архітектура GrooveNet включає в себе: модуль мобільності, модуль передачі повідомлень по різних каналах зв'язку і інші.

GrooveNet підтримує моделювання поведінки тисяч автомобілів в будь-якому місті США, а також додавання нових мережевих моделей, моделей безпеки, різних моделей взаємодії. Він забезпечує кілька мережевих

інтерфейсів і дозволяє ініціювати різні події (з бортового комп'ютера).

GrooveNet підтримує три типи імітованих вузлів:

- транспортні засоби, здатні передавати багатofакторні дані по одному або декільком виділених каналах ближнього зв'язку (DSRC);
- стаціонарні вузли інфраструктури;
- мобільні шлюзи, призначені для забезпечення взаємодії типу V2V і V2I.

GrooveNet підтримує кілька типів повідомлень, таких як повідомлення GPS, які періодично транслюються, щоб інформувати сусідів про поточну позицію транспортного засобу, а також повідомлення про події. Кожному повідомленню може призначатися свій пріоритет. Для дослідження проблеми ширококомовної розсилки були реалізовані кілька політик ретрансляції. GrooveNet може підтримувати гібридні симуляції, де імітується положення, напрямок руху і повідомлення транспортного засобу передаються по стільниковому інтерфейсу з одного або декількох вузлів інфраструктури. Реальні транспортні засоби спілкуються тільки з імітованими автомобілями, які знаходяться в межах діапазону його передачі. GrooveNet створює карти рівня вулиці для будь-якого місця в США, імпортуючи файли TIGER, які доступні. GrooveNet має велику кількість доповнень, включаючи абстракцію вулиць, мережу, імітаційні моделі на основі графіків і крос-платформний графічний інтерфейс в Qt.

NCTUns (National Chiao Tung University Simulator) [7] являє собою високоточний і розширюваний мережевий симулятор, здатний імітувати різні протоколи, які використовуються як в провідних, так і в безпроводних IP-мережах. Його основна технологія заснована на новій методології повторного введення ядра. Завдяки цій новій методології *NCTUns* надає безліч унікальних переваг, які не можуть бути легко досягнуті традиційними мережевими симуляторами, такими як NS-2 і OPNET.

Мережевий симулятор і емулятор *NCTUns* має безліч корисних функцій. Його можна легко використовувати в якості емулятора, оскільки він

підтримує безшовну інтеграцію емуляції і моделювання. Він використовує стек протоколів TCP/IP для отримання результатів симуляції високої точності. Він може запускати будь-яку реальну прикладну програму UNIX на змодельованому вузлі без будь-яких змін. Підтримувані мережі включають в себе фіксований Інтернет на основі Ethernet, бездротові локальні мережі IEEE 802.11b, бездротові локальні мережі IEEE 802.11e QoS, бездротові мережі WiMAX IEEE 802.16d, супутникові мережі DVBRCS, бездротові автомобільні мережі для інтелектуальних транспортних систем (включаючи V2V і V2I) , мультиінтерфейс мобільних вузлів для гетерогенних бездротових мереж, мобільні WiMAX-мережі IEEE 802.16e, IEEE 802.11p / 1609WAVE бездротові транспортні мережі та ін.

NCTUns підтримує паралельне моделювання на багатоядерних обчислювальних системах. Він також забезпечує високо інтегроване і професійне середовище графічного інтерфейсу, яке може допомогти користувачеві швидко:

- створити мережеві топології;
- налаштувати модулі мережевих протоколів;
- вказати шляхи переміщення мобільних вузлів;
- побудувати графік продуктивності мережі;
- відтворити анімації трасування передачі пакетів і ін.

Всі ці операції можна легко, інтуїтивно і швидко виконати за допомогою графічного інтерфейсу. Його основним недоліком є те, що NCTUns вимагає встановити дистрибутив Fedora 9 Linux, що створює велику проблему для більшості дослідників VANET, обмежуючи його широке використання.

MobiREAL [9] пропонує нову методологію моделювання мобільності вузлів і оцінки програм MANET. Це мережевий симулятор, який може імітувати реалістичну мобільність людей, транспортних засобів і дозволяє змінювати їх поведінку в залежності від конкретного контексту програми.

MobiREAL описує мобільність вузлів з використанням мови програмування C++. Для опису поведінки мобільних вузлів він використовує вірогідну модель, засновану на правилах, які часто використовуються в когнітивному моделюванні поведінки людини. Пропонована модель дозволяє описати, як мобільні вузли можуть змінювати напрямки, маршрути і швидкість на основі аналізу їх положень, оточення (перешкод і сусідніх вузлів) і інформації, отриманої з додатків.

MobiREAL імітує MANET, використовуючи підтримку мобільності, згенерувала в симуляторі Tech Tech Georgia (GTNetS). MobiREAL Animator динамічно візуалізує рух вузлів, стану з'єднань і передачу пакетів. Це покращує розуміння результатів моделювання. Мобільність вузлів моделюється в симуляторі поведінки. Також реалізований алгоритм запобігання зіткнень в тому числі і з пішоходами. Можна також моделювати пробки транспортних засобів. Використовуючи MobiReal, можна одночасно отримати суміш різних моделей мобільності.

Для мобільності автомобілів автори модифікували симулятор трафіку NETSTREAM, розроблений TOYOTA. Оскільки NETSTREAM є пропрієтарним програмним забезпеченням, його основним недоліком є те, що користувачі не можуть отримати доступ і змінити цю частину симулятора, обмежуючи його широке використання. Однак MobiREAL може використовувати інші симулятори трафіку для забезпечення мобільності автомобілів.

4.2 Порівняльний аналіз VANET-симуляторів

У таблиці 4.1 представлено порівняння досліджених імітаторів VANET. Як показано, TraNS використовує SUMO і NS-2, в той час як MobiREAL використовує GTNetS в якості базового мережевого симулятора. Всі симулятори підтримують різні моделі мобільності і забезпечують мікроскопічне моделювання трафіку. NCTUns надає випадкові моделі

швидкості, в той час як інші моделюють вуличну швидкість. В даний час усі тренажери підтримують моделі потоку руху і перетину. До сих пір тільки TraNS і NCTUns мали реалізацію стандарту 802.11p, і тільки GrooveNet і TraNS надають вбудовані додатки VANET. З точки зору простоти налаштування, NCTUns вважається найскладнішим. З точки зору простоти використання кращі TraNS і GrooveNet.

Оскільки ці симулятори були розроблені для різних завдань, результати, отримані при моделюванні аналогічних сценаріїв VANET, можуть сильно відрізнятись. TraNS і GrooveNet були розроблені для імітації VANET. NCTUns був створений для загальних мереж в той час як MobiREAL був розроблений для моделювання MANET. Нещодавно MobiREAL був розширений для підтримки моделювання VANET.

Таблиця 4.1 - Порівняння симуляторів VANET

Найменування	TraNS	GrooveNet	NCTUns	MobiRead
Генератор мобільності	SUMO	CrooveNct	NCTUns	MobiReal
Мережевий симулятор	ns-2	–	–	на базі GTNetS
Моделі мобільності	Випадкове або ручне визначення маршруту	Випадкові точки відправлення та призначення	Випадкове або ручне визначення маршруту	Ймовірнісні на основі правил
Тип моделювання		Мікромобільні, просторово-безперервні і дискретні за часом		
Моделі смуг		Багато смугові вулиці зі зміною смуги руху		
Моделі швидкості	Швидкість визначається правилами	Марківська модель, модель	Випадкова	Швидкість визначається правилами

	дорожнього руху	заснована на навантаженні		дорожнього руху
Модель потоку руху	Наступний автомобіль	Наступний автомобіль	Наступний автомобіль	Наступний автомобіль
Дорожня топологія	Будь-яка	Будь-яка	Визначена користувачем	Будь-яка
Світлофор	Визначається вручну	Визначається вручну	Автоматично генерується на перехрестях	Визначається вручну
Модель перетину перехресть	Право проїзду згідно правил дорожнього руху або управляється світлофором	Керується світлофором	Керується чотирма світлофорами	Право проїзду згідно правил дорожнього руху або управляється світлофором
Модель пересування	Випадкова, настраюється вручну	Настроюється вручну	Настроюється вручну	Настроюється вручну
Простота налаштування	Середня	Середня	Тяжка	Легка
Вбудована підтримка додатків VANET	Попередження про дорожню небезпеку і динамічне перенаправлення потоку	Попередження автомобіля і адаптивна ретрансляція Повідомлень	Немає	Немає
Простота використання	Середня	Тяжка	Тяжка	Складна

Продовження таблиці 4.1

Протоколи засоби VANET	и 802.11р два готових до використання програми VANET: попередження про дорожню небезпеку (безпека) і динамічне перенаправлення (трафік), до 3000 автомобілів	Підтримка V2V, V2I зв'язків декількох типів повідомлень, що періодично транслюються інформуючи сусідів про поточний стан транспортного засобу або аварійної ситуації	802.11р.	Спочатку він був розроблений спеціально для MANETs
Коментарії	Інтегрує як трафік, так і мережеві симулятори. Обмін інформацією в протоколах зв'язку може впливати на поведінку автомобіля в моделі мобільності.	Здатний підтримувати гібридні симуляції (тобто зв'язок між імітованими автомобілями і реальними автомобілями на дорозі)	Підтримує безшовну інтеграцію емуляції і моделювання, але для неї потрібна установка операційної системи Fedora 9	Імітує реалістичну мобільність людей і автомобілів, і їх поведінку може бути змінено в залежності від заданого контексту програми

У табл. 4.2 представлено порівняння графічних інтерфейсів, що надаються дослідженими VANET-симуляторами. Всі симулятори забезпечують як буквено-цифровий, так і вхідний файл конфігурації і

висновок консольних повідомлень, але для користувача інтерфейс TraNS виглядає більш складним, ніж інші. Для TraNS потрібно багато ручних введів параметрів. Всі симулятори забезпечують уявлення топології на рівні вулиці. До сих пір тільки TraNS може підтримувати візуалізацію з використанням Google Earth.

Нарешті, в табл. 4.3 представлено порівняння популярності досліджених імітаторів VANET. Щоб отримати результати, використовувався IEEE Explorer і інструменти Google Scholar для вишукування документів, опублікованих з 2010 по 2020 рік. Розглядаються тільки ті статті, в яких були використані досліджувані симулятори VANET. Як показано, в даний час двома найбільш популярними симуляторами VANET є GrooveNet і NCTUns.

Таблиця 4.2 - Порівняння графічних інтерфейсів VANET.

Назва	Зручність	Топологія	Введення параметрів	Висновок
TraNS	Висока	Google Earth; з можливістю масштабування; перегляд вулиць.	Файл з картами вулиць; файл мобільності. графічний вхід.	ns-2 трасування; .kmz файли (Google Earth).
GrooveNet	Висока	З можливістю масштабування; без перешкод; користувач.	Файл моделювання; графічний вхід; файл топології.	Анімаційний перегляд
NCTUns	Середня	З можливістю масштабування; з перешкодами; визначені користувачем.	Графічний вхід; плитка вуличної карти.	Анімаційний перегляд
MobiREAL	Середня	З можливістю масштабування; без перешкод.	Моделі мобільності; файл щільності і маршрутів; графічний вхід.	Файли трасування; анімаційний перегляд

Таблиця 4.3 - Порівняння популярності

	TraNS	GrooveNet	NCTUns	MobiREAL
Кількість опублікованих документів, в яких використовується симулятор	6	21	21	16
Кількість посилань, знайдених в IEEE Xplore	9	17	15	12
Кількість посилань, знайдених у Google	8	8	25	15

4.3 Вибір середовища імітаційного моделювання

Інтелектуальні транспортні системи і мережі VANET, зокрема, є досить молодим напрямком розвитку галузі інформаційних технологій, тому має досить низьким рівнем практичної реалізації. Це робить практично неможливим варіант проведення досліджень на реальних мережах, особливо, якщо ці дослідження пов'язані з необхідністю зміни режиму роботи мережі.

Створення власних стендів в лабораторних умовах, є вкрай дорогою витівкою і часто недоступною для більшості дослідників. Крім того, в умовах лабораторії складно відтворити всю інфраструктуру і умови, в яких будуть експлуатуватися реальні мережі. Так, для дослідження ключових проблем працездатності мережі, в умовах високої щільності транспортних потоків, детально описаних в попередніх розділах, треба було б відтворити полігон на величезній площі. А для організації мережі, треба було б закупити як мінімум 500 телекомунікаційних модулів і стільки ж транспортних засобів, на які ці модулі треба встановити.

Всі вищеописані чинники говорять про необхідність вирішення поставлених завдань за допомогою використання спеціалізованих систем імітаційного моделювання з подальшою оцінкою отриманої статистики. В даний час широкого поширення набули такі системи, як NS-2, NS-3, GTNeS, OPNET, OMNeT ++, NISTNET, DummyNet, ModelNet, COOJA / MSPSim, ENDE, Emulab, EMPOWER, NSE, Vint / NS, NETWARS, в яких присутні

розширення для дослідження VANET [91].

Одне з лідируючих місць в списку систем імітаційного моделювання займає система NS-2 (Network Simulator версія 2).

NS-2 є об'єктно-орієнтованим програмним продуктом, ядро якого реалізовано на мові C ++, що забезпечує:

- високу продуктивність в процесі моделювання;
- можливість модифікації наявних і розробки нових протоколів;
- дозволяє описати заголовки пакетів з максимальним ступенем деталізації відповідно до стандартів, що підвищує реалістичність моделей.

Конфігурація і опис сценаріїв моделювання проводиться на мові високого рівня абстракції OTcl (Object oriented Tool Command Language). Дана мова має досить простий синтаксис, що полегшує процес побудови сценаріїв моделювання.

До найбільш важливих переваг NS-2 відноситься його відкритість, тобто відсутність будь-яких обмежень на право модифікації вихідного коду і безкоштовність, що робить його доступним для широкого кола осіб і досліджень. Адекватність моделей, побудованих в NS-2, неодноразово підтверджувалася великою кількістю практичних досліджень [92, 93].

4.3.1 Розширення функціональності NS-2

Моделювання мереж VANET в NS-2 стало можливим після розробки і впровадження в інсталяційний пакет, починаючи з версії 2.31, спеціального програмного розширення специфікації IEEE 802.11, що включає модифіковані до відповідності IEEE 802.11р фізичного і канального рівнів. Відмінності в стеку протоколів мобільного вузла стандарту IEEE 802.11, в результаті виконання модифікації, можна побачити на рисунку 4.1.

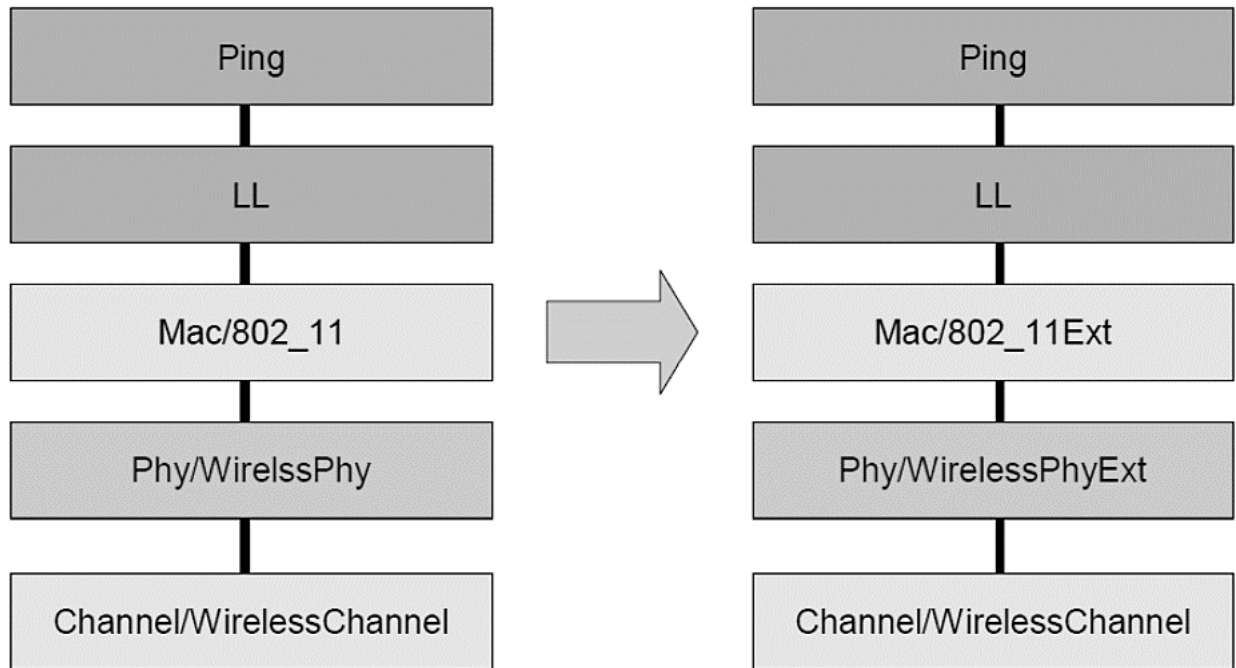


Рисунок 4.1 – Стек протоколу мобільного вузла

Фізичний і каналний рівні модифікованого стеку зазнали змін у функціональній області. Так, на фізичному рівні реалізований інтерфейс контролю потужності сигналу (Power Monitor). Саме цей модуль, за допомогою MIB надає інформацію про потужності, з якими було прийнято кожне з повідомлень, на MAC рівень. Зміни каналного рівня полягають у відстеженні стану каналу, з подальшим управлінням механізмом відстрочки і корекцією процесу обслуговування MAC кадрів. Відстеження стану каналу реалізується модулем ChannelStateMgr. Управління механізмом відстрочки, реалізується модулем BackoffMgr. Цей модуль являє собою планувальник завдань, який також відповідає за напрямок повідомлень в тракт передачі, після закінчення встановленого таймера. Тракт прийому і тракт передачі каналного рівня реалізуються парою модулів, один з яких відповідає за прийом / передачу кадрів, інший за управління даним процесом і реакцію в разі виникнення помилок. Деталізована функціональна структура реалізованого в NS-2 протоколу IEEE 802.11p приведена на рисунку 4.2.

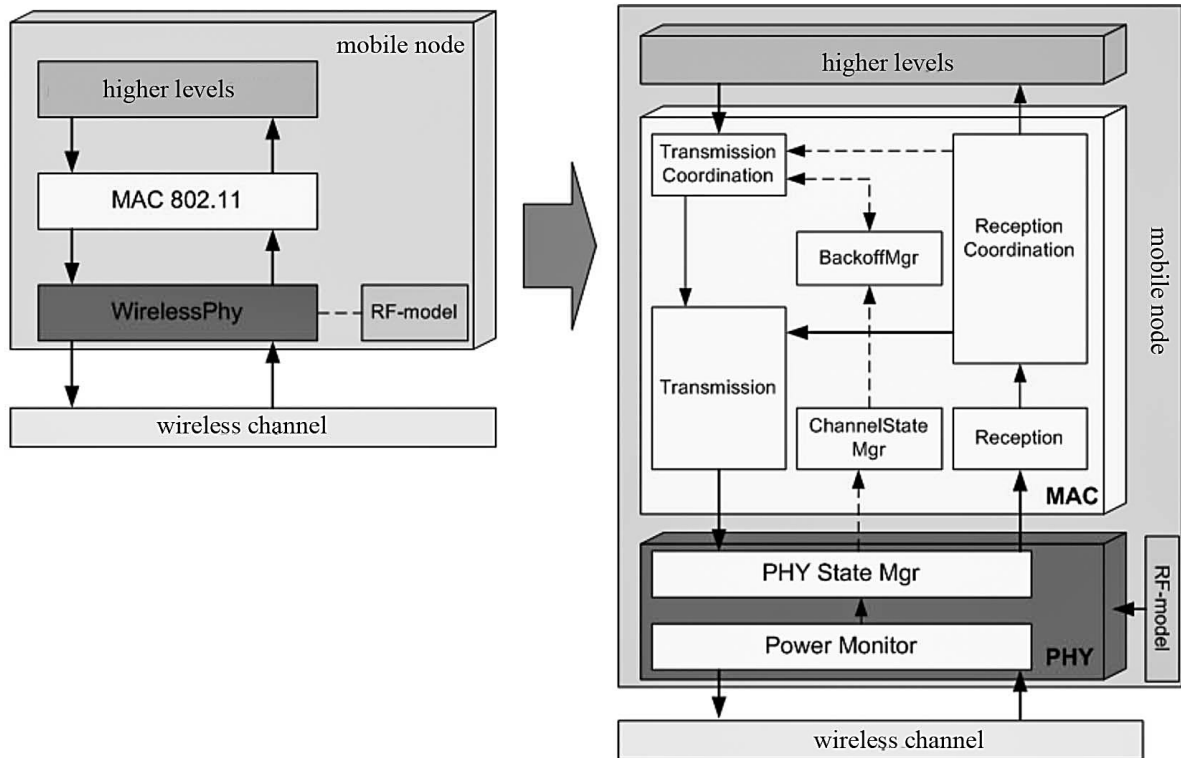


Рисунок 4.2 – Функціональна структура мобільного вузла

З метою додавання математичного моделювання, запропонованого в Главі 2, а також реалізацією протоколів маршрутизації потрібно було внести зміни в існуючі реалізації фізичного та канального рівнів. Для цього в існуючу структуру, наведену на рисунку 4.2, були внесені додаткові програмні модулі.

4.4 Розробка сценарію моделювання

Достовірність отриманих в ході моделювання статистичних даних безпосередньо залежить від ступеня наближення імітованих умов проведення досліджень до умов реальної експлуатації. Імітаційне дослідження мереж VANET, передбачає аналіз ймовірно-часових характеристик мережі з великою кількістю мобільних вузлів. Правила переміщення цих вузлів, повинні враховувати особливості топології дорожньої мережі і залежати від різного роду зовнішніх чинників, таких як завантаженість, сигнали

світлофорів і багатьох інших. Також в процесі підготовки сценарію моделювання необхідно вирішити такі основні завдання, а саме:

- підготовка топологічної карти зони моделювання;
- вибір моделі мобільності для вузлів мережі;
- формування коду сценарію моделювання з урахуванням обраної моделі мобільності і топологічної карти зони моделювання.

4.4.1. Підготовка топологічної карти зони моделювання

Найпростішим сценарієм моделювання, який найбільш часто використовується в наукових працях, є переміщення групи транспортних засобів по прямолінійній ділянці дороги [94]. Цей сценарій дійсно хороший для дослідження характеристик автомобільних мереж, що працюють на замських дорогах або автобанах, але він не придатний для оцінки тих самих характеристик в межах міської зони. Міська дорожня мережа має більш складну і розгалужену структуру, що призводить до виникнення додаткових складнощів при передачі радіосигналу. Крім підвищеного рівня інтерференції, викликаного багатопроблемним характером поширення радіохвиль, описаним більш докладно у другому Розділі, ситуацію ускладнюють перехрестя, на яких зливаються потоки транспортних засобів відразу від декількох доріг. Кожне перехрестя, в залежності від його складності і наявності світлофорів, утворює зону концентрації транспортних засобів з підвищеним рівнем конкуренції за середу передачі. Все це веде до збільшення кількості колізій, а як наслідок, скорочення ймовірності успішної доставки повідомлень і локальним блокуванням працездатності мережі. Вищеописані фактори свідчать про необхідність використання в процесі моделювання дорожніх карт, схожих за своєю структурою з топологією доріг міського середовища.

Для вирішення даного завдання були використані ресурси проекту OSM (Open Street Map), і спеціалізований програмний інструмент TranNS

(Traffic and Network Simulation Environment), що дозволяє конвертувати картографічну інформацію OSM, до вигляду, придатного для використання з симуляторами SUMO і NS-2, більш детальна інформація про які, наведена в розділах 4.1 і 4.2.2. В якості моделі транспортної мережі, для проведених в даній дисертаційній роботі досліджень, була обрана ділянка дорожньої карти Харківського району міста Києва. Результат перетворення картографічної інформації в модель схеми транспортної мережі наведено на рисунку 4.3

4.5 Вибір моделі мобільності

4.5.1 Аналіз існуючих генераторів мобільності

Існує багато робіт, дослідження яких описуються на статистиці, отриманої в результаті моделювання мереж, коли вони здійснюють рух у рамках досліджуваної області з постійною швидкістю. За цієї статистики, яка отримується на виборі моделювання, може істотно відрізнятись від реальності, в реальному житті, автомобілі переміщуються з постійно змінною швидкістю. Все це показує необхідність застосування спеціалізованих програмних засобів, що формують сценарії на основі реалістичних моделей мобільності.

В даний час існує декілька програмних середовищ моделювання, і вони здатні генерувати файли трасування, що відображають рухи транспортних засобів:

- VanetMobiSim [91] є розширенням середовища моделювання мобільності CANU (CanuMobiSim), в якій основна увага приділяється мобільності автомобілів і представлені реалістичної моделі поведінки автомобілів як на макроскопічному, так і на мікроскопічному рівнях.



Рисунок 4.3 – Формування карти дорожніх покриттів для NS-2

На макроскопічному рівні VanetMobiSim може імпортувати карти з бази даних «Топологічно інтегрованого географічного кодування і посилань» (TIGER) з Бюро перепису населення США або довільно генерувати їх з використанням триангуляції Вороного. Файли TIGER/Line являють собою цифрову базу даних про географічні особливості, такі як дороги, залізниці, річки, озера, що охоплюють Сполучені Штати.

У VanetMobiSim додана підтримка багатосмугових доріг, окремих спрямованих потоків, диференційованих обмежень швидкості і дорожніх знаків на перехрестях. На мікроскопічному рівні він підтримує моделі мобільності, такі як інтелектуальна модель водіння (IDM/IM), інтелектуальна модель водіння зі зміною смуги руху (IDM/LC) і модель обгону (MOBIL), яка взаємодіє з IDM/IM для управління зміни смуги руху, прискорення і уповільнення транспортного засобу, забезпечуючи реалістичну взаємодію автомобіля з автомобілем і автомобіля з інфраструктурою. VanetMobiSim заснований на JAVA і може генерувати траси руху в різних форматах, підтримуючи різні інструменти імітації або емуляції для мобільних мереж, включаючи ns-2 [12], GloMoSim [91] і QualNet.

STRAW (STreet Random Waypoint) забезпечує точні результати моделювання з використанням моделі мобільності автомобілів в реальних містах США на основі реального руху транспорту. Поточна реалізація *STRAW* написана для симулятора дискретних подій JiST / SWANS, і його траси рухливості не можуть бути безпосередньо використані іншими мережевими симуляторами, такими як ns-2. *STRAW* є частиною проекту C3 (Car-to-Car Cooperation). Більш реалістична модель мобільності з відповідним рівнем деталізації для транспортних мереж має вирішальне значення для точного моделювання мереж WANET. Модель мобільності *STRAW* обмежує рух вузлів на вулицях, які визначаються даними карти для реальних міст США, і обмежує їх мобільність відповідно до перевантаженнями транспортних потоків і спрощеними механізмами управління трафіком.

MOVE (генератор моделі *MObility* для мереж *VEhicular*) рис.4.1 швидко генерує реалістичні моделі мобільності для моделювання *VANET*. *MOVE* побудована поверх *SUMO*. Висновок *MOVE* - це файл трасування мобільності, який містить інформацію про реалістичні рухи транспортних засобів, які можуть бути негайно використані в популярних інструментах моделювання мережі, таких як *ns-2* або *GloMoSim*. Крім того, *MOVE* надає графічний інтерфейс користувача, який дозволяє користувачеві швидко генерувати реалістичні сценарії моделювання без необхідності написання сценаріїв, а також вивчення внутрішніх деталей симулятора.

SUMO (Моделювання міської мобільності) рис.4.2, являє собою пакет моделювання дорожнього руху, призначений для роботи з великими дорожніми мережами. Його основні функції включають в себе моделювання руху з нульовою швидкістю, різних типів транспортних засобів, маршрутизацію одного автомобіля, багатосмугові вулиці зі зміною смуги руху, ієрархію типів з'єднань, графічний інтерфейс користувача (GUI) *OpenGL*, і динамічну маршрутизацію. *SUMO* може реалізовувати великі сценарії, тобто до 10 000 вулиць, і може імпортувати безліч мережевих форматів, такі як *Visum*, *Vissim*, *ArcView* або *XMLDescriptions*. Таким чином, об'єднавши *SUMO* і *openstreetmap.org*, ми можемо імітувати трафік в різних точках земної кулі. Однак, оскільки *SUMO* є чистим генератором трафіку, його створені траси не можуть бути безпосередньо використані доступними мережевими симуляторами, що є серйозним недоліком.

FreeSim - повністю настроюваний макроскопічний і мікроскопічний симулятор трафіку, який дозволяє легко представляти і завантажувати кілька автострадних систем в симулятор у вигляді структури даних графа з граничними вагами, обумовленими поточним становищем транспортного засобу і його швидкістю. Трафік і алгоритми графа можуть бути реалізовані для всієї мережі або для окремих транспортних засобів або вузлів, а дані трафіку, використовувані симулятором, можуть генеруватися користувачем або бути перетворені з даних отриманих в реальному часі. Транспортні

засоби FreeSim можуть взаємодіяти з системою, яка контролює рух на автострадах, що робить FreeSim ідеальним для моделювання інтелектуальної транспортної системи (ITS). FreeSim ліцензується відповідно до GNU General Public License, а вихідний код доступний для безкоштовного скачування.

CityMob v.2. CityMob є сумісним з ns-2 моделлю мобільності, призначеної для використання в VANET. CityMob реалізує три різні моделі мобільності:

- проста модель (SM);
- Манхеттенська метрика (MM);
- реалістична модель міста (DM).

У моделі DM вулиці розташовані в сітці з єдиним розміром блоку в області моделювання. Всі вулиці розташовані в двох напрямках, з провулками в обох напрямках. Рух автомобілів обмежено смугами. Транспортні засоби переміщуються з випадковою швидкістю в межах визначеного користувачем діапазону значень. DMmodel також імітує семафори у випадкових положеннях (не тільки при перетинах), але і з різними затримками. DM додає щільність трафіку аналогічно реальному місту, де трафік розподіляється нерівномірно. Отже, з'являться зони з більш високою щільністю транспортних засобів. Ці зони зазвичай знаходяться в центрі міста, і транспортні засоби повинні рухатися повільніше, ніж на околицях.

CityMob DM також має наступні властивості:

- численні смуги в обох напрямках для кожної вулиці;
- черги автомобілів через затори;
- можливість симулювати трафік на магістралях.

4.5.2 Аналіз можливостей генераторів мобільності

У табл. 4.1 наведено короткий аналіз генераторів рухливості транспортних засобів, орієнтований на їх основні характеристики. Метрики згруповані по п'яти різним категоріям:

- характеристики програмного забезпечення;
- типи карт;
- підтримувані моделі мобільності;
- реалізовані моделі трафіку;
- підтримувані формати трасування.

Таблиця 4.1 - Аналіз вивчених генераторів мобільності.

	Vanet MobiSim	SUMO	MOVE	STRAW	Free Sim	City Mob
Характеристики програмного забезпечення						
Портативність	+	+	+	+	+	+
Доступність	+	+	+	+	+	+
Відкритий вхідний код	+	+	+	+	+	+
Можливість використання консолі	-	+	+	-	-	+
Графічний інтерфейс користувача	+	+	+	+	+	+
Доступні приклади	+	+	+	-	+	-
Розвиток проекту	-	+	-	-	-	+
Простота налаштування	середня	середня	проста	середня	проста	проста
Простота використання	середня	складна	середня	середня	проста	проста
типи карт						
Реальні	+	+	+	+	+	-
Визначені користувачем	+	+	+	-	-	-
Випадкові	+	+	+	-	-	+
Підтримувані моделі мобільності						
Випадкова дорожня точка	+	+	+	-	-	+
STRAW	-	+	+	+	-	-
Магістраль	-	+	+	-	-	+
Центр міста	-	-	-	-	-	+
Реалізовані моделі трафіку						

Макроскопічна	-	-	-	-	+	-
Мікроскопічна	+	+	+	+	-	+
Багатосмугові дороги	+	+	+	+	-	+
Зміна смуги руху	+	+	+	+	-	+
Окремі спрямовані потоки	+	+	+	+	-	+
Обмеження швидкості	+	+	+	+	+	+
Знаки дорожнього руху	+	+	+	+	-	+
Керування перехрестями	+	+	+	-	-	-
Критерії перекидання	+	-	-	-	-	-
Великі дорожні мережі	-	+	+	+	-	+
Безконфліктний рух	-	+	+	-	-	+
Різні типи транспортних засобів	-	+	+	-	-	+
Ієрархія типів з'єднань	-	+	+	-	-	-
Розрахунок маршруту	+	+	+	+	+	-
Підтримувані формати трасування						
Підтримка трасування ns-2	+	-	+	-	-	+
Підтримка GloMoSim	+	-	+	-	-	-
Підтримка QualNet	+	-	+	-	-	-
Підтримка SWANS	-	-	-	+	-	-
Підтримка трасування на основі XML	+	-	-	-	-	-
Імпорт різних форматів	+	+	+	-	-	-

Як показало дослідження, не існує генератора мобільності, який би відповідав вимогам, що пред'являються дослідним співтовариствам. Freesim є вільно поширюваним програмним забезпеченням, але обмеженим в інших функціях. CityMob хороший в програмних функціях і підтримки моделей трафіку. SUMO, MOVE, STRAW і VanetMobiSim мають хороші програмні функції і підтримку моделі трафіку. Проте, тільки VanetMobiSim забезпечує чудову підтримку трасування. Що стосується GUI, вони інтуїтивно зрозумілі

і зручні для користувача.

В якості вирішення проблеми підбору моделі мобільності, для цілей даної дисертаційної роботи був обраний симулятор транспортних потоків SUMO (Simulator of Urban MObility), розроблений в інституті транспортних систем при національному аерокосмічному центрі Німеччини (DLR).

Цей симулятор є одним з найбільш поширених і визнаних інструментів в наукових дослідженнях, присвячених вивченню транспортних систем. Також як і у випадку із середовищем моделювання NS-2, широке поширення цей симулятор отримав за рахунок відсутності плати за використання і наявності відкритого коду.

Основними функціональними перевагами платформи SUMO, що зумовлюють вибір її для досліджень, є:

- можливість імпорту топологічних карт дорожньої мережі;
- можливість імпорту або генерація сценаріїв управління світлофорами;
- наочна візуалізація роботи сценарію мобільності.

Процес моделювання досліджуваної ділянки, передбачає наявність на карті більше 100 транспортних засобів, які здійснюють рух на основі моделі мобільності, і з урахуванням моделі схеми перемикання світлофорів, закладених в симуляторі SUMO.

4.6 Перевірка імітаційної моделі

Для реалізованої імітаційної моделі необхідна перевірка адекватності отриманих результатів. Така перевірка включає в себе дві категорії оцінок - верифікація моделей та перевірка даних. Процедури верифікації проводять, щоб переконатися, що модель веде себе так, як було задумано. Верифікація імітаційної моделі передбачає доведення можливостей використання створеної програмної моделі у якості машинного аналога концептуальних моделей на основі забезпечення максимального співпадіння з останніми [95].

Реалізована імітаційна модель, призначена для імітації роботи спеціалізованої мережі VANET. Значимими складовими моделі, що визначають концептуальні особливості поведінки мережі, є реалізація каналного рівня передачі даних, а також протоколів маршрутизації, що досліджуються.

У процесі верифікації каналного рівня перевірялось відсутність колізії при передачі для пристроїв, що знаходяться в зоні дії радіопередавача. Також перевіряється той факт, що кожний пристрій може передавати потік даних через дані через розподілене середовище. При цьому відсоток навантаження на канали знаходився від 10% до 90%.

Таким чином було перевірено механізм корекції роботи RTS / CTS [34], що представляє в даному випадку технологію доступу до середи, а також механізм корекції часу передачі пакетів [96].

Для верифікації протоколів маршрутизації була проведена їх покрокова трасировка.

Для протоколів FSR та FSRM було досліджено час поширення маршрутної інформації. Так для протоколу FSR час оновлення маршрутної інформації в ідеальних умовах може бути обчислено як

$$t = \begin{cases} k * t_r * t_1, & k < k_1 \\ k_1 * t_r * t_i + (k - k_1) * t_r * t_2, & k_1 < k < k_1 \\ k_2 * t_r * t_i + (k_2 - k_1) * t_r * t_2 + (k - k_2 - k_1) * t_2, & k_2 < k < k_3 \end{cases}$$

де k_i - кількість хопів зони,

t_i - інтервал оновлення для зони,

t_r - мінімальний інтервал оновлення.

Для протоколу FSRM цей час може бути вчислено як $t = k * t_r * t_1$.

Покрокова трасировка протоколів маршрутизації показала принципову

відповідність їх роботи з теоретичними пропозиціями, а також правильність обробки вхідних даних. Таким чином, у ході випробування імітаційної моделі було досліджено внутрішню відповідність стану мережі.

Валідація даних, направлена на перевірку того, що всі дані, що використовуються в моделях, забезпечують необхідну точність і не суперечать системі яка досліджується, а також значення параметрів, точно визначені та правильно використовуються. У процесі перевірки даних були досліджені параметри розподілу значених вихідних даних.

Для розробленої імітаційної моделі проведено оцінку стійкості та точності вихідних даних. Для оцінки стійкості даних було досліджено зміну дисперсії вихідних даних при зміні часу моделювання. Проведено дослідження мережі, що працює зі 100 OBU.

Для маршрутизації використовувався протокол FSR. У якості оцінюваного параметра було вибрано значення коефіцієнта максимального середнього часу. Дисперсія для даного критерію була в задовільному інтервалі.

При збільшенні часу моделювання дисперсія не збільшується, таким чином, можна зробити висновок про стійкість отриманих даних.

Для оцінки точності в імітаційну модель був включений клас Validation.

Оцінка точності здійснюється в два етапи.

Перший етап включає в себе перевірку нормальності розподілу отриманих даних за допомогою критерію Колмогорова [97]. Згідно з цим

критерієм міра відхилення емпіричної функції розподілу $F_n^*(x)$ від гіпотетичної функції розподілу $F(x)$ визначається наступним чином:

$$D_n = D \{F_n^*, F\} = \sup_x |F_n^*(x) - F(x)|$$

Гіпотеза про відповідність функції розподілу з гіпотетичної

приймається на рівні значущості α , якщо $\sqrt{n}D_n \leq k_\alpha$, де k_α - квантиль розподілу Колмогорова [98]. На другому етапі обчислюється довірчий інтервал для отриманих даних. Для цього використовується вибіркова дисперсія для вибірки $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Тоді значення отриманого математичного очікування лежить в інтервалі з кінцями в точках $\bar{X} - t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1} \frac{S}{\sqrt{n-1}}$ та $\bar{X} + t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1} \frac{S}{\sqrt{n-1}}$ [97]. Тут $t_{\frac{1+\alpha}{2}, n-1}$ проценти розподілу Стюдента, можуть бути отримані з таблиць [98].

Оцінка точності проводиться безпосередньо в процесі імітаційного моделювання.

4.7 Оцінка якості протоколів маршрутизації для бездротових мереж автомобільного транспорту

Для оцінки якості протоколів маршрутизації останні були реалізовані для роботи в рамках розробленої імітаційної моделі.

Були досліджені наступні рішення:

- протокол FSR,
- протокол FSRM запропонований в третьому розділі.

Для моделювання джерел корисних даних використовувалася модель джерела даних з безперервним контролем, яка описана в другому розділі.

4.7.1 Дослідження впливу щільності мережі на якість обслуговування

У цьому дослідженні щільність мережі оцінюється як середня кількість "сусідів" для пристрою мережі. Щоб змінити цю установку змінювалася площа території, на якій працює бездротова мережа VANET. Під час даного експерименту змінюється параметр - діаметр мережі. Результати експерименту представлені на рисунках 4.4-4.6

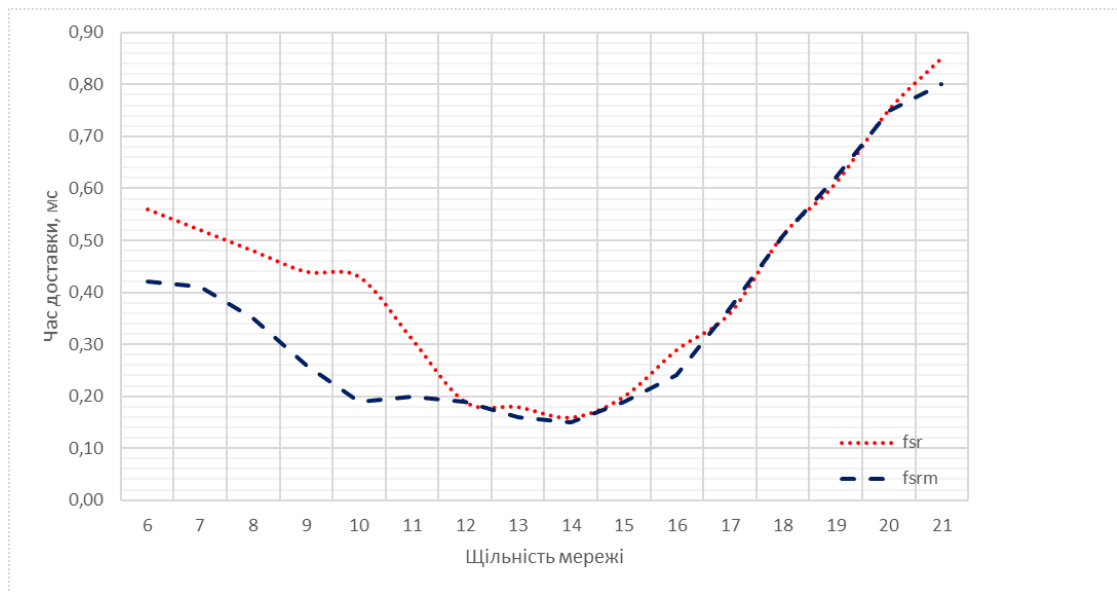


Рисунок 4.4 - Якість доставки даних при зміні щільності. Коефіцієнт максимального середнього часу доставки

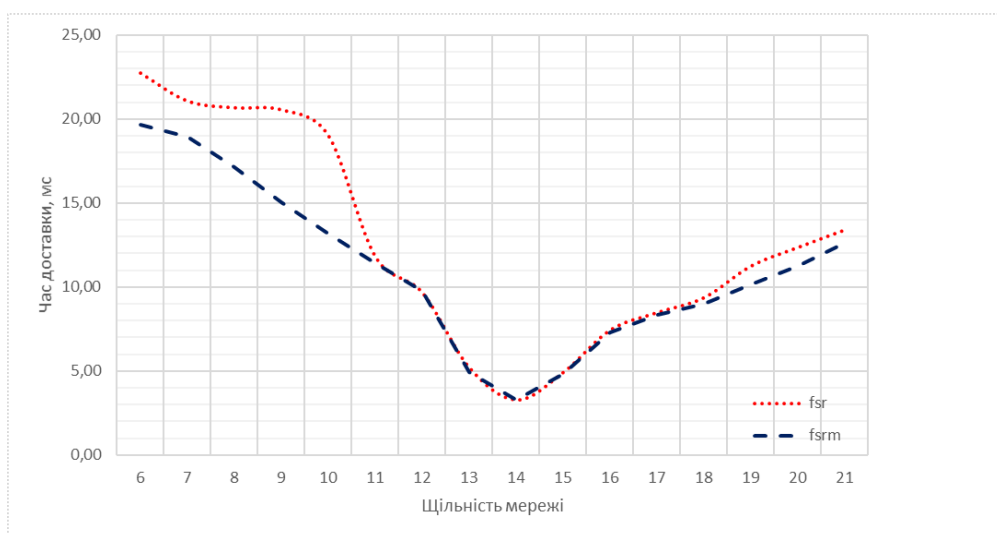


Рисунок 4.5 - Якість доставки даних при зміні щільності. Коефіцієнт максимального часу доставки

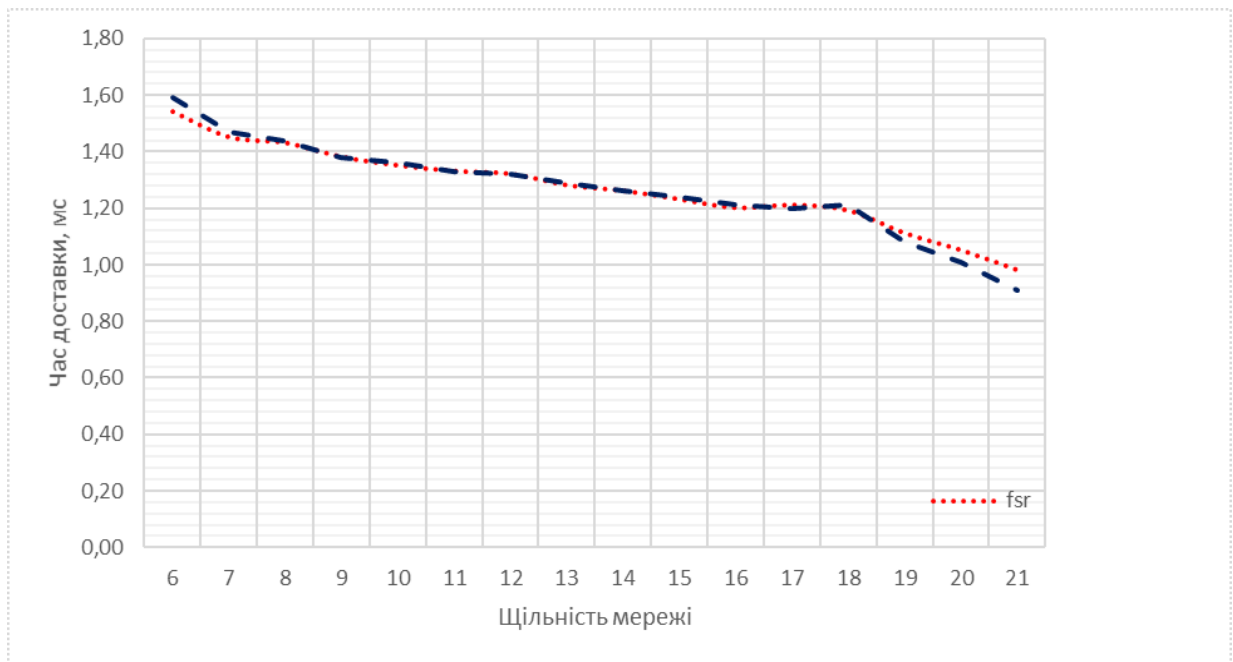


Рисунок 4.6 - Якість доставки даних при зміні щільності. Коефіцієнт максимального відсотка втрат

У мережі з високою щільністю використовувані протоколи маршрутизації працюють більш ефективно, так як в цьому випадку використовується відносно невелика кількість проміжних вузлів-ретрансляторів.

Однак в таких мережах збільшується ймовірність виникнення колізій, що знижує ефективність роботи мережі. У мережах з високою щільністю протоколи маршрутизації показують приблизно однакові значення критеріїв оцінки якості.

При зменшенні щільності мережі ймовірність колізії зменшується, проте зростає число ретрансляція через проміжні вузли.

Для мереж з невеликою щільністю використовуваний протокол маршрутизації грає вирішальну роль. В даному експерименті в якості базового розглядається протокол FSR. Протокол FSRM є модифікацією протоколу FSR. Цей протокол використовує більш ефективну схему попереджувального збору маршрутної інформації. Використовуваний метод, однак, більш накладений за обсягом службового трафіку. Тому такий

протокол більш ефективний в мережах з невеликою щільністю і великим діаметром, де ефективність попереджувального методу збору маршрутних даних зростає, а вплив накладних витрат зменшується, у зв'язку із загальним зменшенням імовірності виникнення колізій.

Протокол FSRM дозволяє отримати значення якості обслуговування до 28% для коефіцієнта максимального середнього часу доставки, і до 46% кращі для коефіцієнта максимального середнього часу доставки.

4.7.2 Дослідження впливу мережевого навантаження на якість обслуговування

В цьому експерименті досліджувався вплив частоти появи пакетів з корисними даними на якість обслуговування мережі автомобільного транспорту. Дослідження проводилося для мережі з великою щільністю, так як в такій мережі протоколи маршрутизації показують найбільш подібні значення якості, тобто мінімізовані інші фактори, що впливають на ефективність роботи мережі.

Результати експерименту представлені на рисунках 4.7-4.9.

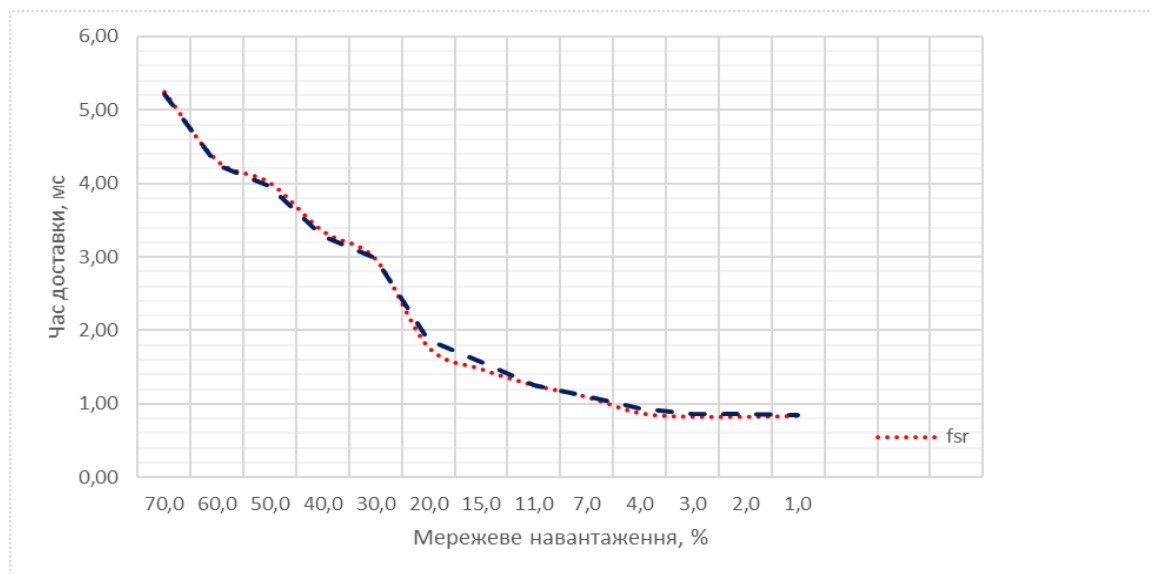


Рисунок 4.7 - Якість доставки даних при зміні мережевого навантаження.

Коефіцієнт максимального середнього часу доставки

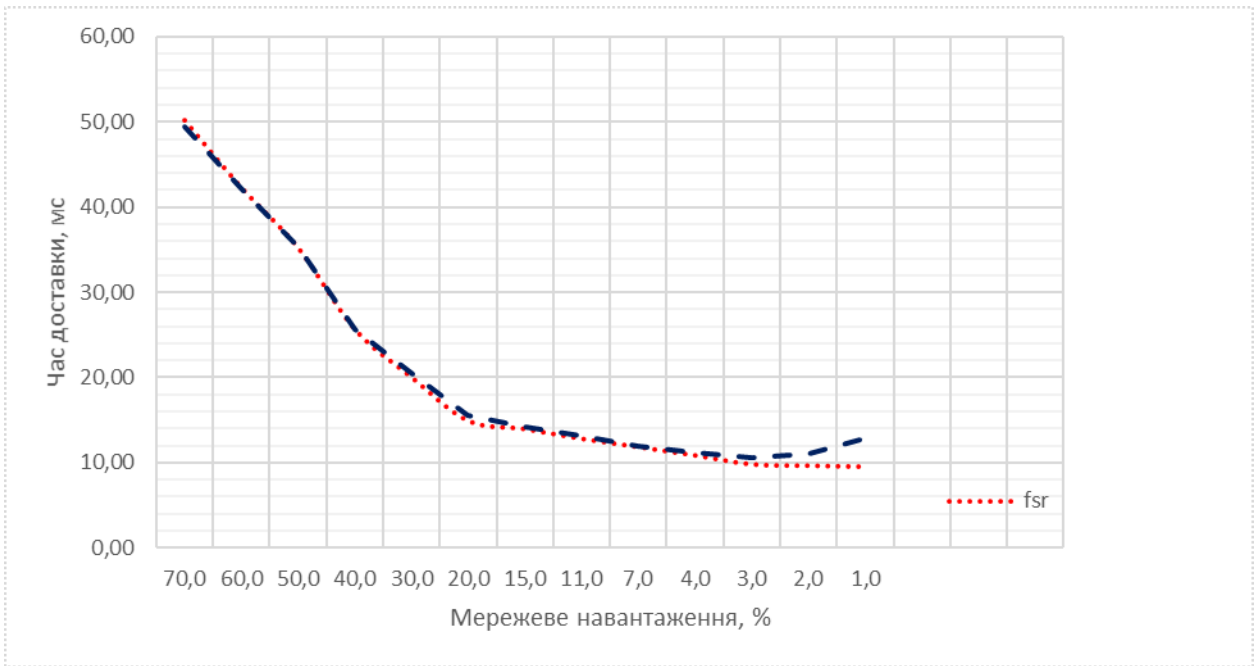


Рисунок 4.8 - Якість доставки даних при зміні мережевого навантаження.
Коефіцієнт максимального часу доставки

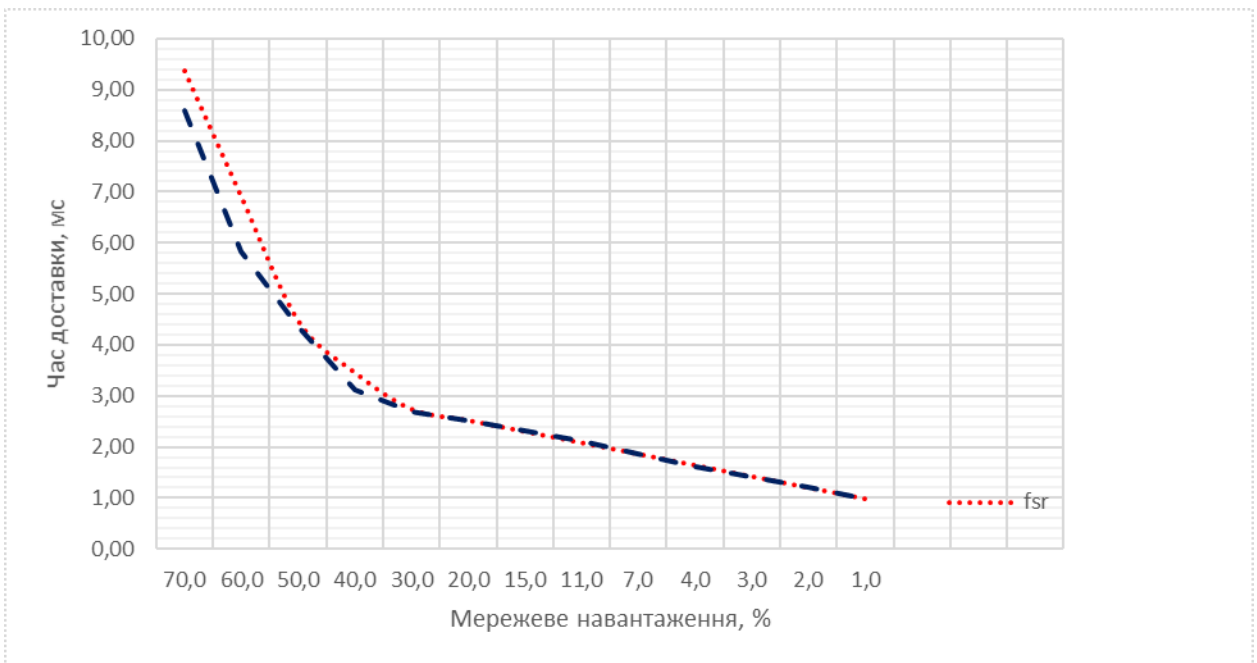


Рисунок 4.9 - Якість доставки даних при зміні мережевого навантаження.
Коефіцієнт максимального відсотка втрат

При збільшенні частоти появи даних збільшується час доставки пакетів через каналний рівень передачі, оскільки середовище більше часу зайняте, а

також зростає ймовірність колізій. Однак при зменшенні частоти появи корисних даних ефективність роботи мережі може зменшитися, так як при рідкісній появі пакетів протоколу маршрутизації складніше обчислити метрики каналів.

Це може виражатися в неправильному призначенні метрик для каналів, а також в їх більш частих змінах. Такі особливості призначення метрик можуть провокувати вибір невірних маршрутів, а також появу циклів при доставці пакетів до вузла призначення. Протокол FSRM в ряді випадків показує кращу ефективність, так як швидше реагує на зміну стану каналів.

4.7.3. Дослідження впливу розміру пакетів на якість обслуговування

В даному експерименті перевірялася залежність якості обслуговування мережі від розміру пакетів з корисними даними. При цьому мережеве навантаження змінювалося від 4.9% до 80%. Результати на рисунках 4.10-4.12.

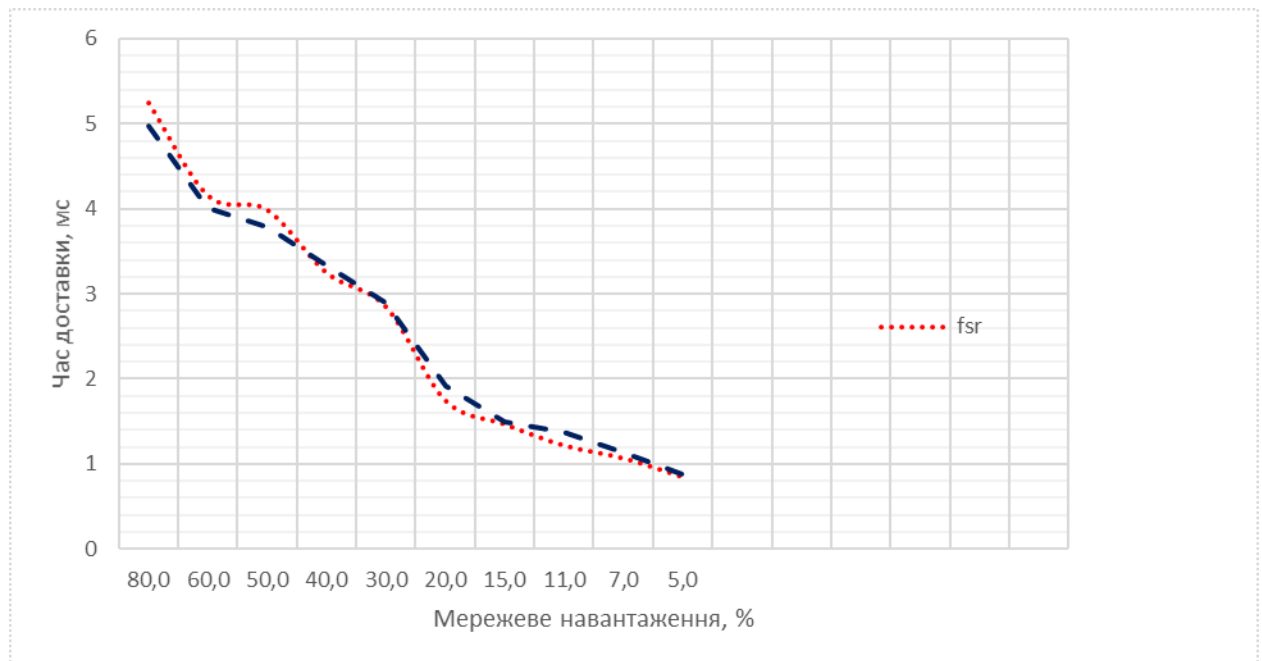


Рисунок 4.10 - Якість доставки даних при зміні розміру пакетів. Коефіцієнт максимального середнього часу доставки

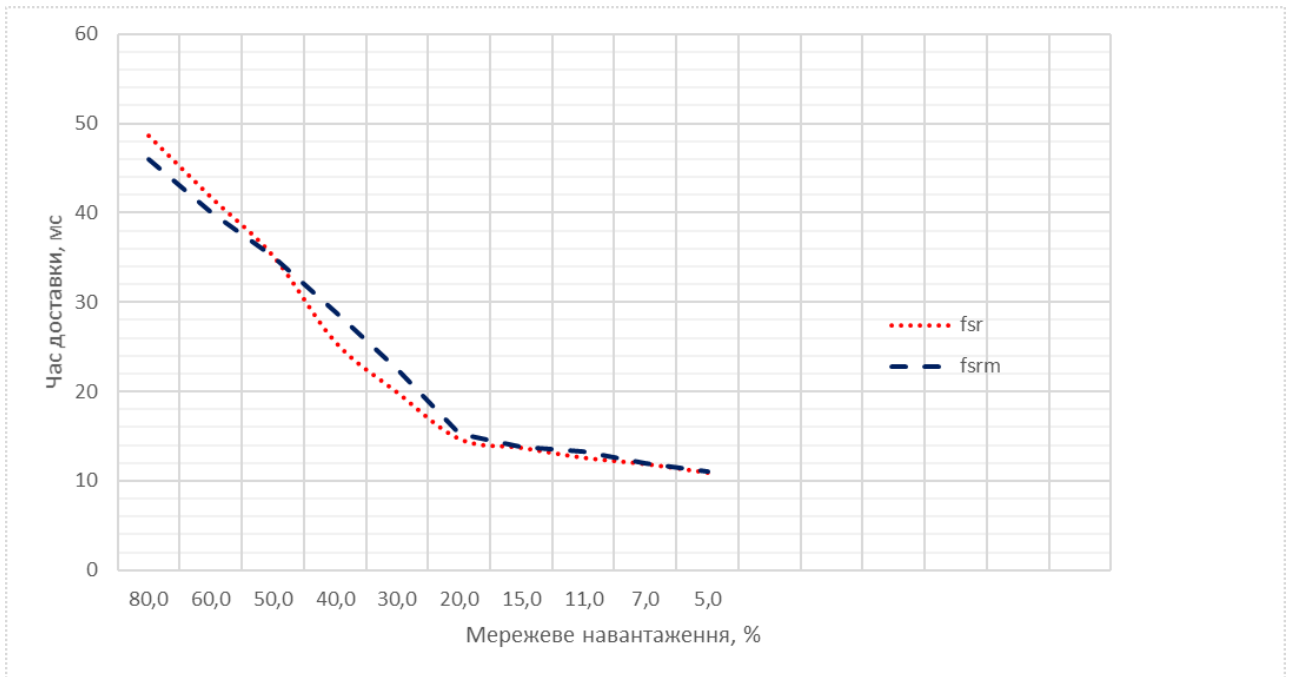


Рисунок 4.11 - Якість доставки даних при зміні розміру пакетів. Коефіцієнт максимального часу доставки

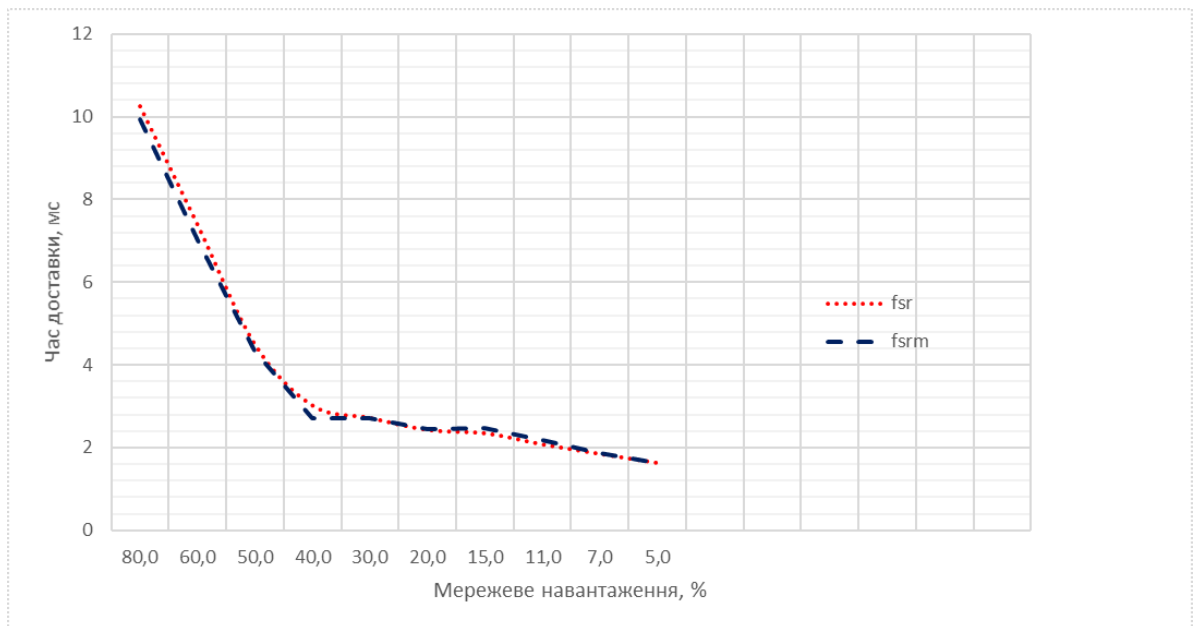


Рисунок 4.12 - Якість доставки даних при зміні розміру пакетів. Коефіцієнт максимального відсотка втрат

При збільшенні розміру пакетів найбільший вплив на ефективність визначають, як правило, не протоколи маршрутизації, а технологія доступу до середовища передачі.

Однак в будь-якому випадку, протокол маршрутизації який використовується, впливає на якість роботи мережі, так як тільки від нього залежить кількість службового трафіку, а також обраний маршрут для доставки, який в свою чергу залежить від метрики каналу, яка визначається, в тому числі, розміром переданих пакетів.

Як видно з результатів експерименту, в деяких випадках протокол FSRM забезпечує кращу якість обслуговування, так як модифікований спосіб доставки маршрутної інформації дозволяє більш ефективно використовувати канали передачі. Однак можливі ситуації, коли такий алгоритм показує меншу ефективність, так як збільшує накладні витрати.

Висновки по 4 розділу

Проведені в рамках четвертого розділу дослідження, дозволяють зробити наступні висновки:

- були розглянуті існуючі системи імітаційного моделювання, їх переваги і недоліки;
- для моделювання розглянутих мереж була обрана система NS2;
- за допомогою набору інструментів моделювання NS-2, SUMO, TraNS, розроблені імітаційні моделі процесу розподілу трафіку додатків, які використовуються в мережах VANET;
- за допомогою реалізованої імітаційної моделі і запропонованих в 3 розділі критеріїв були отримані параметри якості передачі даних для мереж, що використовують протоколи FSR і FSRM.

ВИСНОВКИ

Проведені в рамках дисертаційної роботи дослідження утворюють теоретичну і практичну основу для проектування та реалізації бездротових мереж автомобільного транспорту, а також розробки для них нових ефективних протоколів маршрутизації.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Запропоновано математичні моделі компонентів мережі VANET: розроблені моделі дозволяють моделювати структуру мереж даного типу, враховуючи їх динамічність. Запропоновані моделі мережевого навантаження дозволяють моделювати трафік такого типу мереж.

2. Запропоновано комплексні показники якості передачі даних для бездротових мереж VANET, що дозволяють проводити порівняння різних рішень для таких мереж.

3. Запропоновано методику оцінки та порівняння протоколів маршрутизації для мереж VANET, що дозволяє порівнювати протоколи мереж автомобільного транспорту побудовані за різними принципами.

4. На базі пакету NS2 розроблено імітаційну модель спеціалізованих мереж VANET. Розроблена модель має об'єктну архітектуру, яка заснована на потоковій моделі. Модель дозволяє знаходити значення критеріїв для оцінки досліджуваних мереж.

5. Розроблено спеціалізований протокол маршрутизації FSRM для мереж VANET, що використовує власний спосіб формування областей видимості для пристроїв.

6. Експериментально доведено ефективність розробленого протоколу. Даний протокол дозволяє підвищити ефективність роботи мережі в деяких випадках на 46%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berezivskyi M. Evaluation of information systems reliability indicators with limited a priori information / M. Berezivskyi, V. Vyshnivskyi, Yu. Kargapolov, Yu. Berezovska, R. Kosminskyi // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic).- 2021. VOL 1, No 63, p.8-14.
2. Berezivskyi M.Y. Mathematical modeling of VANET network topologies / M.Y. Berezivskyi, V. Vyshnivskyi, O. Zinchenko, Yu. Berezovska Yu. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2021. VOL 1, No 59 (59), p. 26-29.
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. Рижаків // Зв'язок. - 2020. - №6 (148) – С. 58-60.
- 5 Anand, P. Intelligent Vehicular Networks and Communications Fundamentals, Architectures and Solutions / P. Anand, N. Chilamkurti, A. Daniel, S. Rho // Todd Green, 2017. - 227 p.
- 6 ETSI EN 302 665 V1.1.2 (2014-03) European Standard (Telecommunications series) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture
7. IEEE 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture
- 8.Yan, X. Research and Development of Intelligent Transportation Systems. / Yan X., Zhang H., Wu C. // 2012 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering & Science. 2012. pp.321-327
9. Кучерявый, А. Е. Самоорганизующиеся сети. / Кучерявый А. Е.,

Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. // СПб, “Любавич”, 2011.

10.ETSI EN 302 637-3 V1.2.1 (2014-09) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service

11.Anand, P. Intelligent Vehicular Networks and Communications Fundamentals, Architectures and Solutions / P. Anand, N. Chilamkurti, A. Daniel, S. Rho // Todd Green, 2017. - 227 p.

12.The NOW: Network on Wheels project — Режим доступа: <http://www.network-on-wheels.de>

13. Torrent-Moreno, M. “NoW Network on Wheels: Project Objectives, Technology and Achievements,” / M.Torrent-Moreno, S. Schnauffer, R. Eigner, C. Catrinescu, J. Kunisch, // 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), March 2008., pp. 211–216

14.Car2Car Communication Consortium, official webpage: <http://www.carto-car.org>

15.Сайт комитета ИЕС. — Режим доступа: <https://www.iec.ch/about/>

16.Dimitrakopoulos, G. Current Technologies in Vehicular Communication / Dimitrakopoulos G. // Springer International Publishing AG 2017, - 121 p.

17.Сайт комитета CEN. — Режим доступа: <http://www.itsstandards.eu/wgs>

18.Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport Text with EEA relevance

19. M/453 Standardisation mandate addressed to cen, cenelec and etsi in the field of information and communication technologies to support the interoperability of co-operative systems for intelligent transport in the european community. Brussels, 6 th October 2009

20.ETSI EN 302 637-2 V1.3.1 (2014-09) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification

of Cooperative Awareness Basic Service

21.Проект COMeSafety. — Режим доступа: <http://www.ecomove-project.eu/links/comesafety/>

22. Проект eCoMove. — Режим доступа: <http://ecomove.dk>

23.IEEE 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture

24. IEEE 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture

25.IEEE 1609.2a-2017 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments--Security Services for Applications and Management Messages – Amendment

26.IEEE 1609.3-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) -- Networking Services 1

27. IEEE 1609.4-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) -- Multi-Channel Operation

28.IEEE 1609.11-2010 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS)

29.IEEE 1609.12-2016 IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations

30.ETSI EN 302 665 V1.1.2 (2014-03) European Standard (Telecommunications series) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture

31.ETSI TS 102 636-3 V1.1.1 (2010-03) Technical Specification. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network architecture

32.ETSI TS 102 637-3 V1.1.1 (2010-09)Intelligent Transport Systems (ITS);Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service

33.ETSI TS 102 637-4 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular

Communications; Basic set of applications; Part 4: Operational Requirements.

34.ETSI EN 302 636-5-1 V2.1.1 (2017-08) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol

35.ETSI EN 302 663 V1.2.1 (2013-05). Intelligent Transport Systems (ITS);. Access layer specification for. Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band

36.ETSI EN 302 636-5-1 V2.1.1 (2017-08) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol

37.Ayyappan, B. Vehicular Ad Hoc Networks (VANET): Architectures, methodologies and design issues / B. Ayyappan, P. Mohan Kumar // 2016 Second International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM). 30-31 March 2016. – P. 177-180.

38.Jakubiak, J.State of the art and research challenges for VANETs / Jakubiak J., Koucheryavy Y. // Proceedings, IEEE CCNC 2008, Las Vegas, USA, January 10-12, 2008. – P. 912-916

39. ETSI TS 101 539-1 V1.1.1 (2013-08) Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 1: Road Hazard Signalling (RHS) application requirements specification

40. ETSI TS 101 539-3 V1.1.1 (2013-11) Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 3: Longitudinal Collision Risk Warning (LCRW) application requirements specification

41.Rahman, K. A. Towards a cross-layer based MAC for smooth V2V and V2I communications for safety applications in DSRC/WAVE based systems / K. A. Rahman, K. E. Tepe // 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. 2014. - P. 969 – 973

42.Behnad, A. Probability of Node to Base Station Connectivity in One-Dimensional Ad Hoc Networks / Behnad A., Nader-Esfahani S. // Communications Letters, IEEE (Volume:14 , Issue: 7) . July 2010. – P. 650- 652.

43. Benabdallah, F. Simulation and analysis of VANETS performances based on the choice of mobility model / F. Benabdallah, A. Hamza, M. Bechrif // 2017 Computing Conference. 2017. - P. 1238 – 1242.

44. Benaidja, A. An Optimal Broadcast of Warning Messages in Vehicular Ad Hoc Networks / A. Benaidja, S. Moussaoui, F. Naït-Abdesselam // International Journal of Computer and Information Technology (ISSN: 2279 – 0764), Sep. 2013. – P. 986-992

45. Miorandi, D. Connectivity in one-dimensional ad hoc networks: a queueing theoretical approach / Miorandi D., Altman E. // Wireless Networks, vol. 12, no. 5, Sep. 2006. – P. 573–587.

46. Naja, R. Wireless Vehicular Networks for Car Collision Avoidance / Rola Naja // Springer-Verlag New York. 2013. - 264 p.

47. ETSI TS 101 556-1 V1.1.1 (2012-07) Intelligent Transport Systems (ITS); Infrastructure to Vehicle Communication; Electric Vehicle Charging Spot Notification Specification

48. ETSI TS 101 556-2 V1.1.1 (2016-02) Intelligent Transport Systems (ITS); Infrastructure to Vehicle Communication; Part 2: Communication system specification to support application requirements for Tyre Information System (TIS) and Tyre Pressure Gauge (TPG) interoperability

49. ETSI TS 101 556-3 V1.1.1 (2014-10) Intelligent Transport Systems (ITS); Infrastructure to Vehicle Communications; Part 3: Communications system for the planning and reservation of EV energy supply using wireless networks

50. Кучерявый, Е. Особенности развития и текущие проблемы автомобильных беспроводных сетей VANET/ Кучерявый Е., Винель А., Ярцев С. // “Электросвязь”, № 1, январь 2009, с. 24–28.

51. Shi, L. Spectrum Requirement for Vehicle-to-Vehicle Communication for Traffic Safety/ L. Shi, K. Won Sung // 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 18-21 May 2014. – P. 1-5.

52. Pyykonen, P. Vehicle ITS station for C2X communication. / P. Pyykonen, K. Kauvo, J. Viitanen, P. Eloranta // 2014 IEEE 10th International

Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). 2014.
- P. 211 – 214

53.Mishra, P. Design Approach for Accidents Notification in Vehicular Ad Hoc Network./ P. Mishra, A. Jaiswal. // 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies. 2015. - P. 164-168

54.Bastani, S. Impact of beaconing policies on traffic density estimation accuracy in traffic information systems. / S. Bastani, L. Libman, S. Travis Waller // Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014. 2014. - P. 1-6.

55.Allal, S. and S. Boudjit, 2013. Geocast routing protocols for VANETs: Survey and geometry-driven scheme proposal. J. Internet Services Inform. Security, 3: 20-36.

56.Al-Omari, S.A.K. and P. Sumari, 2010. An overview of mobile ad hoc networks for the existing protocols and applications. Int. J. Applic. Graph Theory Wireless Ad Hoc Netw. Sensor Netw., 2: 87-110. DOI: 10.5121/jgraphhoc.2010.2107

57.Altayeb, M. and I. Mahgoub, 2013. A survey of vehicular ad hoc networks routing protocols. Int. J. Innovat. Applied Stud., 3: 829-846.

58.Bilal, S.M., C.J. Bernardos and C. Guerrero, 2013. Position-based routing in vehicular networks: A survey. J. Netw. Comput. Applic., 36: 685-697. DOI: 10.1016/j.jnca.2012.12.023

59.Chaturvedi, K. and K. Shrivastava, 2013. Mobile ad-hoc network: A review. Int. J. Innovative Res. Eng. Multidisciplinary Phys. Sci.

60.Da Cunha, F.D., A. Boukerche, L. Villas, A.C. Viana and A.A.F. Loureiro, 2014. Data communication in VANETs: A survey, challenges and applications. PhD Diss., INRIA Saclay; INRIA.

61.Dhankhar, S. and S. Agrawal, 2014. VANETs: A survey on routing protocols and issues. Int. J. Innovative Res. Sci. Eng. Technol., 3: 13427-13435.

62.Duduku, V., V.A. Chekima, F. Wong and J.A. Dargham, 2015. A survey on routing protocols in vehicular ad hoc networks. Int. J. Innovative Res. Comput.

Commun. Eng., 3: 12071-12079.

63.Gajbhiye, V.A. and R.W. Jasutkar, 2013. Study of Efficient Routing Protocols for VANET. *Int. J. Scientific Eng. Res.*, 4: 1-8.

64.Gayathri, N. and S.R. Kumar, 2015. Critical analysis of various routing protocols in VANET. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Software Eng.*, 5: 619-623.

65.Haerri, J., F. Filali and C. Bonnet, 2006. Performance comparison of AODV and OLSR in VANETS urban environments under realistic mobility patterns. *Proceedings of the of 5th IFIP Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop (AHNW' 06)*.

66.Hanzo, L. and R. Tafazolli, 2007. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks. *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, 9: 50-70. DOI: 10.1109/COMST.2007.382407

67.Jain, J. and N. Chahal, 2016. A review on VANET, types, characteristics and various approaches. *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, 5: 239-245.

68.Kale, M.R.A., S.R. Gupta and B.R. Prmit, 2013. An overview of MANET ad hoc network. *Int. J. Comput. Sci. Applic.*, 6: 223-227.

69.Kihl, M., M.L. Sichitiu and H.P. Joshi, 2007. Design and Evaluation of two Geocast Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks. Swedish Governmental Agency for Innovation Systems (Vinnova). Kukade, A. and T. Sharma, 2015. A glance over the working methodology of VANET. *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, 4: 322-326.

70.Kumar, P. and A. Kumar, 2013. Simulation based analysis of DSR, LAR and DREAM routing protocol for mobile ad hoc networks. *Int. J. Comput. Sci. Inform. Technol.*, 3: 58-62.

71Kumar, R. and M. Dave, 2011. A comparative study of various routing protocols in VANET. *Int. J. Comput. Sci. Issues*, 8: 643-648.

72.Kumar, V., S. Mishra and N. Chand, 2013. Applications of VANETs: Present and future. *Commun. Netw.*, 5: 12-15. DOI: 10.4236/cn.2013.51B004

73.Lee, K.C., U. Lee and M. Gerla, 2013. Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks. In: *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks*:

Developments and Challenges Reference, IGI Global, pp: 149-170.

74.Liang, W., Z. Li, H. Zhang, S. Wang and R. Bie, 2015. Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges and trends. Int.

75.J. Distr. Sensor Netw. Lin, C.R. and M. Gerla, 1997. Adaptive clustering for mobile wireless networks. IEEE J. Selected Areas Commun., 15: 1265-1275. DOI: 10.1109/49.622910

76.Luo, Y., W. Zhang and Y. Hu, 2010. A new cluster based routing protocol for VANET. Proceedings of the 2nd International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing, Apr. 24-25, IEEE Xplore Press, Wuhan, Hubei, China, pp: 176-180. DOI: 10.1109/NSWCTC.2010.48

77.Malik, P., 2012. Consequences of limited MANET resources. Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Software Eng.

78.Mandale, M.P.R., M.M. Ghonge and M.V. Sarode, 2014. Reconnaissance of routing protocol in VANET. Int. J. Res. Advent Technol., 2: 365-371.

79Nagar, J.K. and A. Singhrova, 2014. A review paper for comparative study of different routing protocols in VANET. Int. J. Enhanced Res. Sci. Technol. Eng., 3: 313-320.

80.Маковеева М.М. Системы связи с подвижными объектами / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. - М.: Радио и связь, 2002. - 440 с.

81.Карабуто, А. Сенсорные сети [Электроний ресурс] / А. Карабуто. - Электрон, дан. - Режим доступа: <http://offline.computerra.ru/2004/553/35459/>

82.B. Bellur "A Reliable, Efficient Topology Broadcast Protocol for Dynamic Networks" / B. Bellur, R. G. Ogier // Proc. IEEE INFOCOM. - 1999.

83.R. G. Ogier et al. "Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)" [draft-ietf-manet-tbrpf-05.txt]/ R. G. Ogier et al. // INTERNET-DRAFT, MANET Working Group. - 2002.

84.Pei G. "Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks" / G. Pei, M. Gerla, T.-W. Chen // Proc. ICC 2000, New Orleans. - 2000.

85.P. Jacquet et al. "Optimized Link State Routing Protocol" [draft-ietf-

manetolsr-05.txt] / IETF MANET.- 2000.

86.Cesar A. Santivanez "Making link-state routing scale for ad hoc networks" / Cesar A. Santivanez, Ram Ramanathan, Ioannis Stavrakakis // Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. - 2001. - pages: 22-32.

87.Broch J. "A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols" / J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva // ACM/IEEE MOBICOM. - 1998. - pages: 85-97.

88.Das S.R. "Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks" / S.R. Das, C.E. Perkins and E. M. Royer// In Proceedings of IEEE INFOCOM. - 2000.

89.Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks / P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek and M. Degermark // Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM. - 1999. - pages: 195- 206.

90.Mangharam R, Weller D, Rajkumar R, Mudalige P, Bai F. GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks. Carnegie Mellon University, 2006. Available at: <http://www.seas.upenn.edu/rahulm/Research/GrooveNet/>

91.Martin J. GloMoSim. Global mobile information systems simulation library. UCLA Parallel Computing Laboratory, 2001. Available at: <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>

92.Torabi, N. Implementation of the IEEE 802.11p/1609.4 DSRC/WAVE in NS-2 / N. Torabi, B. S. Ghahfarokhi // 2014 4th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCCKE). 2014. - P. 519-524

93.Poonial, R. C. Performance evaluation of radio propagation model for vehicular ad hoc networks using vanetmobisim and ns-2 / R. C. Poonial, V. Singh. // International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS) Vol.3, No.4, July 2012. – P. 145-155.

94.Chen, Z.D. Ad Hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highways / Chen, Z.D., Kung, H. and Vlah, D. // MobiHoc, 2001. – P. 247-250.

95.Fishman G.S. "The Analysis of Simulation-Generated Time Series" / G.S.

Fishman, P.J. Kiviat // Management Science. - 1967. - v. 13, № 7.

96. Bianchi Giuseppe "Performance analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function" / Giuseppe Bianchi // Selected Areas in Communications", IEEE Journal on. - 2000. - Volume: 18, Issue: 3, pages: 535-547.

97. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. — 12-е изд., перераб. — М.: Высшее образование, 2006. — 479 с.: ил. — (Основы наук).

98. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. - М.: Наука, 1983. - 416 с.