

Д. С. Положий, О. О. Орехов

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В АВТОМОБІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ ITS

Анотація. Розглянуто якість передачі повідомлень у бездротовій автомобільній мережі, як ключового компонента надійності інтелектуальних транспортних систем (ITS) з акцентом на технології зв'язку між об'єктами автомобільної мережі VANET. Аналіз результатів попередніх досліджень якості зв'язку за стандартом IEEE 802.11p виявили його нездатність підтримувати обслуговування сучасних автомобільних програм. Досліджено особливості передачі даних в мережі за стандартом IEEE 802.11bd, який рекомендовано у останньому звіті європейської CCAM платформи [1] для обміну повідомленнями «транспортний засіб - транспортний засіб» і «транспортний засіб - інфраструктура». Проведено аналітичне моделювання якості обслуговування мережі за стандартом IEEE 802.11bd з використанням марківських ланцюгів. Результати моделювання підтвердили гіпотезу, що протокол передачі повідомлень за стандартом IEEE 802.11bd забезпечує високу якість зв'язку в мережі VANET.

Ключові слова: інтелектуальна транспортна система, автомобільна мережа, аналітична модель, IEEE 802.11 bd, якість, виділений зв'язок, обслуговування мережі.

Вступ та опис проблеми

Посилення інтенсивності транспортного руху на сучасних трасах збільшує небезпеку дорожнього руху і кількість ДТП, ускладнює пересування по великих містах, створюючи «пробки» та підвищує небезпеку для пішоходів. Інтелектуальні транспортні системи (ITS) покликані вирішити проблеми

дорожнього руху, і, крім того, сформувати інфраструктуру для транспорту з автоматичним управлінням.

ITS складаються з підсистем мобільного, стаціонарного і верхнього рівня (рис. 1), які обмінюються інформаційними повідомленнями різних стандартів, що пов'язано з різними вимогами до швидкості та дальності передачі сигналу зв'язку.

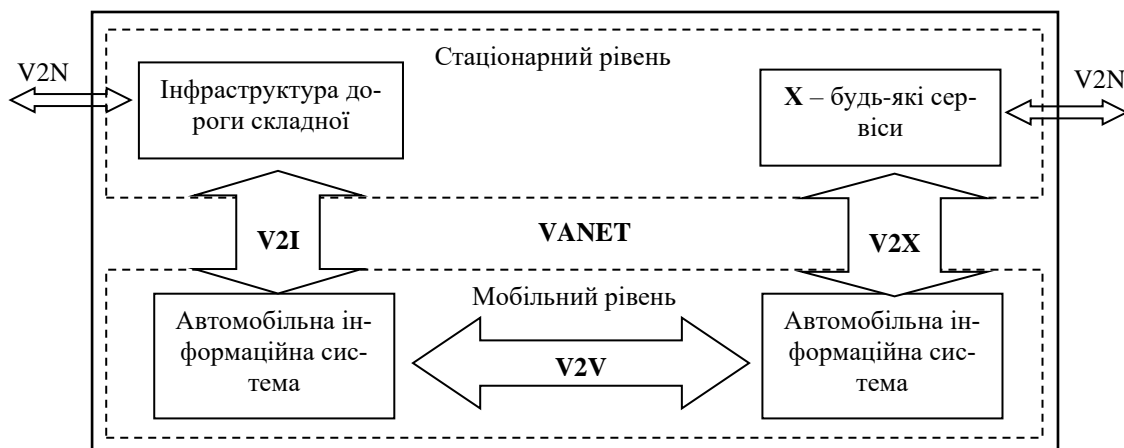


Рис. 1. Структура мобільної транспортної мережі VANET

Мобільний рівень ITS складають розумні транспортні засоби (ОБУ), які надсилають одне одному повідомлення типу V2V (транспортний засіб – транспортний засіб), створюючи таким чином самоорганізовану мережу для запобігання небезпечним ситуаціям. Крім того, за допомогою зв'язку V2I (транспортний засіб – інфраструктура) здійснюється обмін інформацією з пристроями дорожньої інфраструктури (RSU), яка отримує повідомлення з мобільних об'єктів дорожнього руху та оповіщає водіїв (автопілотів) про події на ділянці дороги на інші повідомлення, як то правила дорожнього руху, обмеження швидкості тощо. Всі інфраструктурні і транспортні об'єкти мережі забезпечені крім того зв'язком типу V2N із сервером та стільниковими системами, що складають верхній рівень ITS, який здійснює

загальне управління дорожнім рухом, координацію різних його сегментів.

VANET (Vehicular Ad-Hoc Network) — це технологія, яка забезпечує інтелектуальний зв'язок між мобільними транспортними засобами, заснована на використанні виділеного зв'язку малого радіусу дії. Інтеграція VANET із універсальними сенсорними мережами (USN) має великий потенціал для підвищення безпеки та ефективності дорожнього руху. Більшість додатків VANET застосовуються в режимі реального часу і чутливі до затримок, особливо ті, що стосуються безпеки та здоров'я людини. Тому моделювання різних режимів процесу зв'язку для нового стандарту є необхідним і дуже важливим.

Якість зв'язку у мережі VANET має найбільш критичне значення для забезпечення надійності

роботи ITS, оскільки саме від цієї дільниці системи залежатимуть вчасні дії водія по запобіганню ДТП на дорозі. Цей зв'язок повинен відповідати вимогам швидкості та достовірності передачі повідомлень, особливо таких як «екстремне гальмування», «небезпечна ситуація» або «пробка». З іншого боку, у разі повідомлення колони автомобілів засобами VANET, виникають затримки внаслідок малого радіусу дії сигналу, а передача його по ланцюгу V2V викликає додаткові затримки. Отже, ключовою проблемою, яку слід вирішити в бездротових автомобільних мережах є забезпечення якості обслуговування (QoS).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективність і масштабність впровадження проєктів інтелектуальних транспортних систем викликає широкий інтерес дослідників та проєктувальників – від загальних принципів формування основних функціональних складових системи, структури багаторівневої логіки надання послуг і обслуговування потоків даних [2] до дослідження ймовірності справного стану елементарного фрагмента системи [3]. З'являється також не мало сервісів і додатків для автомобільних інтелектуальних мереж, і вимоги до якості обслуговування їх інформаційних обмінів збільшуються.

У 2010 році для підтримки зв'язку у мережі VANET було запропоновано спеціальний стандарт виділеного зв'язку IEEE 802.11р. Для оцінки та аналізу характеристик зв'язку по стандарту IEEE 802.11р фахівцями було проведено низку досліджень продуктивності каналу [4, 5, 6].

В [4] Yuan Yao із співавторами провели оцінювання продуктивності протоколу IEEE 802.11р MAC (medium access control), який використовується в забезпеченні безпеки транспортних засобів V2V з двома пріоритетними повідомленнями в звичайному середовищі шосе. По результатам проведеного аналізу, автори запропонували покращити продуктивність пріоритетного трафіку за допомогою IEEE 802.11р EDCA для підтримки якості передачі. Однак передача сигналів з нижчим пріоритетом, за спостереженнями авторів, не відповідає вимогам якості обслуговування при передачі у реальному часі.

У [5] Song і співавтори проаналізували продуктивність багатоканального IEEE 802.11р у мережах VANET. Дослідники розглянули декілька особливостей стандарту та багатоканальності за допомогою перемикань у своїй моделі. Були розроблені однови-

мірні та двовимірні моделі ланцюга Маркова, що створює більшу обґрунтованість оцінки аналізу. Але не враховувався вплив помилок передачі на продуктивність мережі.

В [6] автори виконали моделювання продуктивності сценарію V2I (транспортний засіб – інфраструктура) у загальному та пакетному масштабі системи в каналі передачі даних стандарту IEEE 802.11рWAVE за допомогою марківських ланцюгів.

По отриманим результатам набули висновку, що ймовірність помилок передачі є параметром, який має значний вплив на точність роботи мережі. Відмова від цього параметра в моделі IEEE 802.11р EDCA обмежує її можливості, тому що модель не зможе правильно передбачити продуктивність мережі в схильному до помилок каналі. Збільшення інтенсивності транспортного руху і бітові помилки призводять до зменшення якості обслуговування мережі, що веде до збільшення кількості зіткнень на дорозі.

Отже, дослідження мереж IEEE 802.11р показало, що вони можуть задовольнити вимоги більшості програм безпеки та ефективності трафіку, якщо мережевий трафік помірний.

Але мережі, побудовані на протоколі стандарту IEEE 802.11р навряд чи відповідатимуть більш жорстким вимогам нових програм для автомобільної мережі, які накладатимуть неоднорідні і більш жорсткі вимоги - найсуворіші встановлюють вимогу для максимальної затримки 3 мс, наприклад такі, як додатки автономного керування транспортним засобом та керування колоною.

Вимоги до деяких сучасних транспортних додатків, які використовуються у VANET, були вивчені у [7]. Програми для автомобільної мережі поділяються на чотири категорії: керування транспортним засобом, автоматизоване водіння, автоматизовані датчики та дистанційне водіння. Вимоги до якості обслуговування (QoS) мережею передачі даних для наведених сегментів додатків узагальнено в табл. 1.

Для усунення недоліків стандарту IEEE 802.11р, в 2022 році IEEE запусив новий проєкт IEEE 802.11bd [8], який є розвитком попереднього. Він визначає модифікації як фізичного рівня IEEE 802.11 (PHY), так і підрівня керування доступом до середовища (MAC) для зв'язку наступного покоління транспортного засобу з усім (V2X) що працює на максимальній об'ємній швидкості передачі даних в діапазоні 5,9 ГГц (12 Мбіт/с у каналі 10 МГц) і 60 ГГц [8].

Таблиця 1 – Вимоги до QoS у різних сегментах додатків

Сегмент використання	Макс. затримка (мс)	Розмір пакета передачі (байт)	Надійність, %	Швидкість передачі даних, (Мбіт/с)	Мін. діапазон сигналу (м)
Керування авто	10-500	50-6000	90-99,99	50-65	80-350
Автоматизоване водіння	3-1, 3-100	300-12000	90-99,99	10-50	360-500
Автоматизовані датчики	3-1, 3-100	1600	90-99,99	10-1000	50-1000
Дистанційне водіння	5	-	99,99	UL:25 DL:1	-

Джерело: складено автором на основі [7].

Особливості використання нового стандарту IEEE 802.11bd досліджено в багатьох роботах [9, 10]. У [10] представлено порівняння стандартів IEEE 802.11bd, IEEE 802.11p і Cellular V2X, показано, що мережі на основі C-V2X і IEEE 802.11bd сприяють зменшенню кількості ДТП у порівнянні з мережами на основі IEEE 802.11p. Важливою особливістю нового стандарту IEEE 802.11bd є техніка зв'язування каналів, яка дозволяє передавати дані в двох суміжних каналах одночасно, що збільшує швидкість передачі даних і, відповідно, зменшує затримки та коефіцієнт втрат пакетів. Але практичне використання

систем передач за протоколом IEEE 802.11bd потребує попередніх досліджень.

Постановка завдання

Метою статті є дослідження якості обслуговування каналу зв'язку V2X у мережі VANET, побудованому на стандарті IEEE 802.11bd, із швидкістю передачі даних в діапазоні 5,9 ГГц (12 Мбіт/с у каналі 10 МГц). Для цього проводимо математичне моделювання якості обслуговування по сценарію V2I, яке враховує рівень MAC і обробку сигналів вищого рівня, враховуючи характеристики трафіку трьох основних ITS-сервісів, наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри сигналів для послуг

Параметри	Значення для послуг		
	1	2	3
Розмір сповіщення, байт	171	50	200 - 1200
Час між пакетами, с	0,1	0,1	1
Розподіл	Пуассона		
Тривалість періоду увімкнення, с	60		
Тривалість періоду вимкнення, с	20		

Джерело: складено автором на основі [11].

Виклад основного матеріалу

Програми безпеки привернули значну увагу, оскільки вони безпосередньо пов'язані з мінімізацією кількості аварій на дорозі. Категорія безпеки співставна з класом Active Road Safety, який спрямовано на надання послуг поінформованості водія та попередження через програми «Кооперативна обізнаність» (CA), «Кооперативна допомога водіям» (CDA) і «Попередження про небезпеку на дорозі та зіткнення» (RHCW). Активну безпеку на дорозі забезпечують насамперед функції інформування, які передають інформацію водієві під час звичайного водіння, попереджають водія про небезпечні умови на дорозі та ймовірні аварії та активно допомагають водієві уникати загрозливих аварій. Іншими словами, програми, пов'язані з безпекою, відповідають за: інформування, попередження та допомогу. Тому для моделювання у обираємо інфраструктурний прилад, який надає послуги наведених трьох видів.

Послуга 1: Попередження про туманну зону. Покликана попередити водія, що знаходиться поблизу туманної зони, про неминучу небезпеку. Це тип послуг сповіщення про небезпеку на дорозі (RHCN). Ця послуга належить до програми попередження про небезпеку на дорозі та зіткнення (RHCW).

Послуга 2: Міждистанційне вимірювання. Транспортний засіб (OBU) використовує обмін даними датчиків і надсилає вимірювання, пов'язані з відстанню між транспортними засобами. Це допомагає водіям підтримувати безпечну дистанцію між транспортними засобами, щоб гарантувати, що екстрене гальмування не призведе до зіткнень між автомобілями ззаду. Це тип послуги кооперативної системи водіння.

Послуга 3: Попереджувальна подія на дорозі. OBU оснащений фронтальною камерою, яка знімає та надсилає фото при виявленні події попередження про дорогу (поворот дороги, пагорб, швидкість дорожнього знака тощо) тим самим здійснює попередження та фотоповідомлення. Це дозволяє інфраструктурній службі приймати рішення про актуальність події попередження. Це тип служби сповіщень про особливості дороги. Послуга належить до програми попередження про небезпеку на дорозі та зіткнення (RHCW).

Оскільки на якість обслуговування мережі значно впливають варіації та статистичний розподіл трафіку, в моделі потрібно продемонструвати характеристики кожної із служб та виконати моделювання трафіку.

Опис сервісів. Сервіс 1: Попередження для служби зони туману (DEN) Передача повідомлень триває протягом часу перебування станції в зоні дії RSU. Оскільки повідомлення періодично генеруються у разі виявлення події, передача повідомлень відбувається протягом періоду активності (період ON); час, що залишився, є інтервалом часу мовчання (період ВИМК.). Період увімкнення триває до тих пір, поки станція OBU не покине зону RSU або не припинить реєструвати небезпечну подію.

Сервіс 2: Служба міжстанційного вимірювання (CAM). Повідомлення спільної інформації (CAM) періодично передаються кожним транспортним засобом і містять інформацію, зібрану з бортових датчиків. У моделі розглядаємо CAM-повідомлення, що несуть метрику міжстанційного транспортного засобу. Кожну секунду OBU надсилає на RSU повідомлення розміром 50 байт із частотою 10 Гц.

Сервіс 3: Подія попередження про дорогу (CoDM). Коли OBU автомобіля знаходиться в зоні покриття RSU, він надсилає зображення після виявлення події попередження про дорожній об'єкт. Залежно від програми зображення може бути надіслано як одним блоком, так і декількома фрагментами. Попередження про дорожній рух приймає модель ON/OFF; період увімкнення означає час, протягом якого автомобіль надсилає фотопакети, а період вимкнення – це час, протягом якого автомобіль знаходиться в зоні покриття RSU, але не надсилає будьякий пакет. Під час періоду увімкнення OBU щосекунди надсилає повідомлення CoDM розміром від 200 до 1200 байт до RSU протягом часу перебування OBU.

Моделювання пристроїв та мережевого рівня зв'язку. Рівень об'єктів. Приймаємо наступне припущення щодо трьох класів обслуговування:

r – це клас обслуговування (у нас 1, 2, 3), мережевий/транспортний рівень;

λr – інтенсивність для обслуговування r потоку надходження трафіку (незалежні процеси Пуассона);

μr – параметр для послуги r швидкості обслуговування, що відповідає експоненціальному розподілу;

M – кількість транспортних засобів OBU,

n_i ($i=1, \dots, M$) – загальна кількість пакетів в OBU $_i$ в зоні покриття RSU, $n=(n_1, n_2, \dots, n_M)$,

ρ_i – навантаження OBU $_i$,

ρ_{ir} , μ_{ir} та λ_{ir} – відповідно навантаження, швидкість обслуговування та середня інтенсивність надходження послуги r що працює на OBU $_i$.

e_{ir} – середня кількість відвідувань OBU $_i$ за класом обслуговування r .

Процес надходження Пуассона та експоненціальний розподіл швидкості обслуговування дозволяють моделювати систему з трьома чергами M/M/1 на кожному рівні. Кожна черга надає послуги одного класу обслуговування. В результаті моделюємо трафік, який передається верхніми рівнями архітектури за допомогою мереж черги повідомлень, або системи масового обслуговування в реальному часі з пріоритетами (СМО). Функція розподілу ймовірностей стаціонарного стану для однокласової (r) незалежної від навантаження відкритої СМО визначається добутком

розподілу ймовірностей стаціонарного стану ізольованих черг визначається за формулою:

$$F(n) = \prod_{i=1}^M \rho_i(n_i),$$

$$\rho_i(n_i) = (1 - \rho_i) \rho_i^{n_i} \prod_{i=1}^M \frac{1}{n_i!} \left(\frac{\lambda r \cdot e_{ir}}{\mu r} \right)^{n_i}.$$

Для кожного класу обслуговування, що виконується на пристрої i , отримуємо параметри якості обслуговування на рівні засобів/мережі за формулами:

– середня швидкість обслуговування: $Dir = \lambda_{ir}$

– середня кількість пакетів:

$$L_{ir} = \frac{\rho_{ir}}{1 - \rho_{ir}};$$

– середній час перебування:

$$T_{ir} = \frac{L_{ir}}{Dir};$$

– середній час очікування:

$$W_{ir} = T_{ir} - \frac{1}{\mu_{ir}}.$$

Такий аналіз продуктивності дозволяє оцінити потік інформаційних пакетів на верхніх рівнях і визначає вхідні дані нижнього рівня.

Моделювання радіорівня МАС. Після обробки засобами та мережевим рівнем пакети послуг передаються на рівень МАС радіозв'язку. Щоб реалізувати диференціацію послуг, встановлюються пріоритети пакетам послуг. Зіставимо три служби з категоріями доступу EDCA наступним чином:

- служба попереджень містить критичну інформацію, тому віднесена до категорії доступу з найвищим пріоритетом AC_VO;

- служба вимірювання генерує важливі дані та відображається на AC_BE; часта передача повідомлень САМ долає ненадійність AC_BE;

- служба попередження про дорогу зіставлена з AC_BK.

Параметри EDCA, використані в математичному дослідженні та моделюванні, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри категорій доступу EDCA

ITS Сервіси	EDCA категорії доступу	Cwmin		Cwmax		AIFSN	
		CCH	SCH	CCH	SCH	CCH	SCH
Дорожня подія	AC_BK	15	15	511	511	9	7
Вимірювання міжвідстаней	AC_BE	7	15	15	511	6	3
Попередження про туманну зону	AC_VO	3	3	7	7	2	2

Джерело: складено автором на основі [11]

Моделювання радіорівня МАС виконуємо за допомогою мультікласу M/GI/1 (з трьома класами обслуговування), який приймає політику пріоритету без виключення для кожного класу обслуговування. Пакети, що належать до класу обслуговування,

відповідають розподілу Пуассона. Служба дотримується загального закону незалежного прибуття.

Для кожної послуги r позначимо:

$E[Nr]$ – кількість пакетів, що очікують в черзі,

$E[Xr]$ – середній час обслуговування,

$E[Wr]$ – середній час очікування;

$E[Rr]$ – незавершені процеси в черзі очікування.

За формулою Поллачека-Хінчіна [12] отримаємо основні параметри якості обслуговування для оцінки системи невипереджувального пріоритету M/GI/1 для кожного класу обслуговування r :

– середня кількість пакетів $E(Nr)$:

$$\rho r + \frac{\rho^2 r (1 + C^2)}{2(1 - \rho r)};$$

– середній час перебування $E(Sr)$:

$$E(Sr) = E(Xr) + E(Wr);$$

- середній час очікування $E(Wr)$:

$$\frac{E(W0)}{(1 - \rho r) \left(1 - \sum_{r=1}^3 \rho r\right)}; \quad (1)$$

де C – коефіцієнт варіації; $E[W0]$ – середній час очікування в черзі.

Середній час очікування не враховує час відстрочки, тому модифікували вираз (1), щоб охопити ефект відставання:

$$\frac{E(W0)}{(1 - \rho r) \left(1 - \sum_{r=1}^3 \rho r\right)} + \sum_{i=0}^{cwmin} p(backoffr = i).$$

Оскільки вікно відстрочки є цілим випадковим значенням і дотримуючись $[1, CW + 1]$ в рівномірному розподілі розмірів вікна, з $Cw \in [Cwmin, Cwmax]$, ймовірність P відобразити вікно відстрочки визначається як:

$$P(backoff = i) = \frac{1}{Cwmin + 1}.$$

Щоб оцінити якість обслуговування мережі V2I, що містить OBU, які запускають три служби,

порівнюємо аналітичні результати, отримані з попереднього математичного моделювання, з моделюванням за сценарієм.

Сценарій моделювання. Моделювання проведено за допомогою симулятора OpenModelica. Змодельована топологія – це односмугове шосе протяжністю 5 км. Досліджуємо один RSU із зоною покриття (радіусом) 200 м. Транспортні засоби рухаються за випадковою моделлю в одному напрямку із середньою швидкістю 20 км/год., що відповідає ситуації затору. За оцінками, транспортний засіб залишатиметься в зоні покриття пристрою RSU 2,5 хвилини.

Кожен об'єкт OBU запускає три змодельовані служби:

- служба попередження (повідомлення DEN із середньою швидкістю надходження Пуассона $\lambda_1 = 10$ повідомлень/с);

- служба вимірювання (повідомлення CAM із середньою швидкістю надходження Пуассона $\lambda_2 = 10$ повідомлень/с);

- подія попередження про дорогу (повідомлення CoDM) із середньою швидкістю надходження Пуассона $\lambda_3 = 1$ повідомлень/с).

Послуги зіставляються з категоріями доступу EDCA згідно таблиці 5 і представляють моделі трафіку, визначені вище. Передбачені послуги генерують пакети, які надсилаються по каналу обслуговування SCH № 176, з постійною моделлю розповсюдження. Швидкість передачі 12 Мбіт/с контролюється алгоритмом менеджера швидкості, і враховується посилення -10 дБ. Кількість транспортних засобів змінюється в діапазоні $[5 \dots 100]$ з кроком 5.

Досліджуємо максимальну кількість транспортних засобів у зоні покриття RSU та здатності RSU для передачі всіх повідомлень. Вимірюємо середню швидкість втрат пакетів і затримки. На рис. 2 показано порівняння середніх показників втрати пакетів у залежності від кількості транспортних засобів.

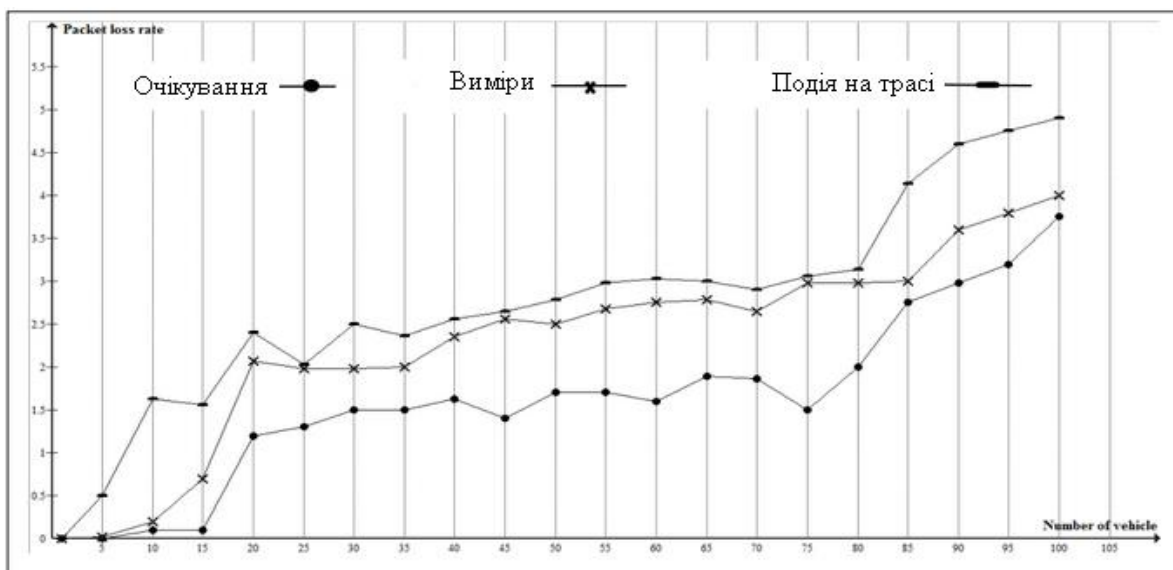


Рис. 2. Залежність середніх показників втрати пакетів від кількості транспортних засобів

Кожна крива пов'язана з однією з послуг: попередження, вимірювання та попереджувальна

подія на дорозі. Швидкість втрати пакетів помірно зростає, коли щільність трафіку коливається від 20

до 80 транспортних засобів, але крім цього швидкість значно зростає для всіх служб додатків. Чим більше транспортних засобів пов'язано з одним RSU, тим частіше транспортні засоби відчувають процес відставання, та тим вищий рівень зіткнень. Рівень втрати пакетів у службі попередження про дорогу є вищим, ніж у вимірюванні, яке є вищим, ніж у попереджувальному повідомленні. Головним чином це пов'язано з різними рівнями пріоритетності послуг. Виявлено, що коли кількість транспортних засобів змінюється в діапазоні [5...30], затримка майже однакова для обох послуг.

Однак воно значно збільшується для служби вимірювання, коли номер транспортного засобу перевищує 45. Затримка попередження більш регулярна в діапазоні [5...80]. Цей результат підтверджує продуктивність EDCA, яка успішно визначає пріоритет попередження над послугою вимірювання. Фактично, зміна відставання є лінійною функцією навантаження дорожнього руху для різних діапазонів зон (300 м, 500 м і 900 м).

Висновки

У роботі проаналізовано структуру бездротової автомобільної мережі інтелектуальної транспортної системи та фактори впливу на якість її обслуговування. Доведено, що найбільше на якість обслуговування в ITS впливають технології зв'язку. Стандарт IEEE 802.11bd спрямований на підвищення надійності передачі, збільшення пропускної здатності та дальності передачі в порівнянні зі стандартом IEEE 802.11p. Проведене моделювання обслуговування інфраструктурним приладом транспортного потоку за допомогою мобільної транспортної мережі підтвердило диференціацію якості обслуговування послуг за різними пріоритетами і дотримання критичного характеру служби попередження для інтенсивного дорожнього руху.

Перспективами подальших досліджень є розвиток моделі обслуговування в ITS в напрямку збільшення кількості послуг, визначення оптимальної кількості інфраструктурних приладів для якості обслуговування, яка забезпечує безпечний дорожній рух.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Final report of the Single Platform for Open Road Testing and Pre-deployment of Cooperative, Connected and Automated and Autonomous Mobility Platform (CCAM platform). URL: https://transport.ec.europa.eu/document/download/15d0f5a7-73cd-48f0-83d3-1c7a160d5854_en?filename=Final%20Report-CCAM%20Platform.pdf
2. Положий Д. С., Орехов О. О. Інтелектуальні системи автомобільної безпеки на основі хмарних архітектур // Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 4. С. 91-95
3. Борисова Л. В., Загора О. В., Феценко А. Б. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі // Проблеми надзвичайних ситуацій, 2020. № 1. С. 34-43
4. Yuan Yao, Yujiao Hu, Gang Yang, Xingshe Xhou. On MAC Access Delay Distribution for IEEE 802.11p Broadcast in Vehicular Networks [2019]. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946989
5. Song C., Performance analysis of the IEEE 802.11p multichannel MAC protocol in vehicular ad hoc networks, Sensors 17 (12) [2017] 2890.
6. Jose R. Gallardo, Dimitrios Makrakis, Hussein T. Mouftah. Mathematical Analysis of EDCA's Performance on the Control Channel of an IEEE 802.11p WAVE Vehicular Network [2017]
7. Study on Enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (v16.2.0 Release 16) [2018].
8. 802.11bd-2022 - IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Next Generation V2X
9. Yacheur B. Y., Ahmed T., Mosbah M., "Implementation and assessment of IEEE 802.11 BD for improved road safety", Proc. IEEE 18th Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC), pp. 1-6, Jan. 2021.
10. Gaurang Naik; Biprav Choudhury; Jung-Min Park. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications [2019] DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919489
11. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)—Multi-channel Operation.
12. Литвинов А.Л. Розробка та дослідження ймовірнісних моделей оцінювання якості інформаційно-управляючих систем // Комуніальне господарство міст, т, 2016, вип.. 126. С. 22-27

Received (Надійшла) 15.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

Simulation of communication quality in the vehicle its network

Denys Polozhyi, Oleksandr Oriekhov

Abstract. The quality of message transmission in a wireless automotive network is considered as a key component of the reliability of intelligent transport systems (ITS) with an emphasis on communication technology between VANET automotive network objects. Analysis of the results of previous studies of the quality of communication according to the IEEE 802.11p standard revealed its inability to support the maintenance of modern automotive applications. The peculiarities of data transmission in the network according to the IEEE 802.11bd standard, which is recommended in the latest report of the European CCAM platform [1] for the exchange of "Vehicle-Vehicle" and "Vehicle-Infrastructure" messages, have been studied. Analytical modeling of network service quality according to the IEEE 802.11bd standard using Markov chains was carried out. The simulation results confirmed the hypothesis that the IEEE 802.11bd message transmission protocol provides high quality communication in the VANET network. Keywords: intelligent transport system, car network, analytical model, IEEE 802.11 bd, quality, dedicated communication, network maintenance.

Keywords: intelligent transport system, automobile network, analytical model, IEEE 802.11 bd, quality, dedicated communication, network maintenance.