

МОДУЛЬНА АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ДАНИХ У СИСТЕМАХ C-ITS

*Влах-Вигриновська Г.І., к.т.н., доцент, Будзін М.Р., магістр,
Національний університет "Львівська політехніка", Україна,
e-mail: halyna.i.vlakh-vyhyrnovska@lpnu.ua*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.01.061>

Анотація.

Дослідження зосереджено на використанні даних, отриманих через діагностичний інтерфейс OBD-II та CAN-шину, в системах C-ITS із застосуванням таких методів обробки, як аналіз кореляції за Пірсоном і лінійна інтерполяція. Системи C-ITS спрямовані на покращення безпеки й ефективності дорожнього руху, особливо в міських умовах. У статті аналізуються існуючі підходи до обробки даних датчиків та прогнозування якості зв'язку V2I за допомогою моделей GRU та VMD-BO-BiLSTM, а також досліджується роль мобільних додатків для інтеграції учасників дорожнього руху.

Ключові слова. C-ITS, sensors, CAN, OBD-II, cloud technologies, mobile applications.

1. Вступ

За останні десятиліття світовий дорожній рух значно зріс, що спричинило численні виклики, серед яких зростання аварійності, заторів та забруднення повітря. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку в дорожньо-транспортних пригодах гине понад мільйон людей, що вимагає невідкладних заходів для підвищення безпеки дорожнього руху. Одним із рішень цих проблем є впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS), зокрема Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS). Ці системи забезпечують обмін даними між транспортними засобами, інфраструктурою та іншими об'єктами, що сприяє зниженню кількості аварій та оптимізації руху. Науковці вже дослідили основи архітектури C-ITS та їхню інтеграцію в міські умови, підкресливши важливість аналізу якості зв'язку між автомобілями та інфраструктурою [1-3]. Окрім забезпечення безпеки, C-ITS мають значний потенціал для вирішення екологічних проблем та зменшення заторів. Використання сучасних сенсорних технологій дозволяє збирати дані з навколишнього середовища та транспортних засобів, що сприяє адаптації системи до реальних умов. Розробка нових підходів до аналізу даних, зокрема методів оцінки заторів, дозволяє забезпечити стійкість та ефективність транспортних мереж. Крім того, впровадження технологій зв'язку V2X, які включають Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I) та інші підходи, створює передумови для покращення взаємодії між транспортними засобами та дорожньою інфраструктурою [4-6].

2. Недоліки

Незважаючи на значний потенціал, Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) стикаються з низкою недоліків, які ускладнюють їхнє впровадження:

- Інтеграція новітніх технологій у вже існуючу інфраструктуру вимагає значних фінансових ресурсів і технічної підготовки.
- У міських умовах якість каналів зв'язку між транспортними засобами та інфраструктурою (V2I) може бути нестабільною, що впливає на ефективність роботи системи.
- Високі вимоги до обчислювальної потужності та обробки великих обсягів даних у реальному часі створюють додаткові технічні виклики.
- Ризики втрати конфіденційності та потреба у додаткових заходах захисту даних під час обміну інформацією залишаються актуальними.
- Недостатня стандартизація V2X-протоколів ускладнює глобальну інтеграцію системи [1-6].

3. Мета

Дослідити ефективність модульної архітектури та алгоритмів обробки даних у системах C-ITS для підвищення безпеки, оптимізації дорожнього руху, аналізу сенсорної інформації, інтеграції учасників дорожнього руху, а також прогнозування якості зв'язку V2I в умовах міського середовища.

4. Дослідження модульної автомобільної архітектури C-ITS

Аналіз даних, що надходять від сенсорів у системі C-ITS, є основним етапом забезпечення точності роботи системи в реальному часі. Для цього використовуються ефективні методи обробки, які дозволяють оцінювати залежності між параметрами та компенсувати пропущені значення. Серед ключових інструментів – кореляція Пірсона та лінійна інтерполяція (рис. 1).

Кореляція Пірсона використовується для визначення лінійного зв'язку між двома змінними, такими як швидкість автомобіля та положення дросельної заслінки. Вона дозволяє оцінити, наскільки зміни одного параметра пов'язані зі змінами іншого. Коефіцієнт кореляції r може приймати значення від -1 до $+1$: значення $+1$ вказує на ідеальний

позитивний зв'язок (обидва параметри змінюються в одному напрямку), -1 – на ідеальний негативний зв'язок (один параметр збільшується, а інший зменшується), а 0 – на відсутність зв'язку [7].

Для обчислення коефіцієнта кореляції використовується формула:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(\sum(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

де x_i і y_i – значення параметрів, а $\bar{x}$ і $\bar{y}$ – їх середні значення. Ця методика дозволяє ідентифікувати критичні ситуації, наприклад, раптові зміни швидкості або різке повертання керма, що може бути сигналом для системи про потенційні небезпеки.

Лінійна інтерполяція, у свою чергу, є важливим методом для узгодження частот вибірки даних від різних сенсорів. Вона заповнює пропущені значення, забезпечуючи цілісність і послідовність даних для подальшого аналізу [8].

Формула лінійної інтерполяції виглядає так:

$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \cdot \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

Цей підхід дозволяє синхронізувати дані, що надходять із сенсорів різної природи, забезпечуючи високу якість і точність аналітичної обробки.

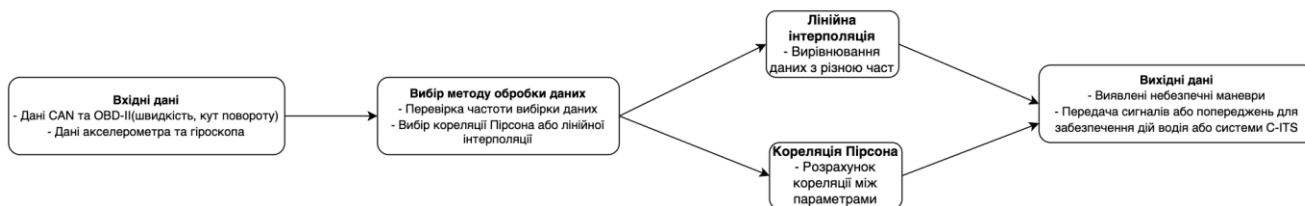


Рис.1. Алгоритм вибору методу обробки даних

Дані, отримані через інтерфейси OBD-II та CAN-шини, є критичними для моніторингу технічного стану автомобіля та забезпечення стабільної роботи кооперативних інтелектуальних транспортних систем (C-ITS). Вони дозволяють отримувати важливу інформацію про параметри автомобіля, такі як оберти двигуна, навантаження, швидкість транспортного засобу, положення педалі акселератора. Аналіз цих параметрів у режимі реального часу сприяє підвищенню безпеки та оптимізації дорожнього руху [11].

Вхідні дані були зібрані на базі автомобіля Opel Astra (2020). Збір інформації з автомобілів різних років випуску залишається актуальним та цінним, особливо коли дані оновлюються в реальному часі та співвідносяться з новітніми дослідженнями чи технологічними розробками. У таблиці представлені ідентифіковані параметри, отримані через CAN та OBD-II, включаючи їхні CAN ID, відповідні байти, одиниці вимірювання, зсуви та масштаби.

Таблиця 1. Identified parameters on Opel Astra (2020) with corresponding characteristics

Параметр	CAN ID	Байт(и)	Одиниця	Зсув	Масштаб
Швидкість двигуна	01A	2-3	об/хв	0	1
Навантаження двигуна	2F3	3	%	-20	4/5
Швидкість автомобіля	1D2	4-5	км/год	0	1/64
Педаль газу	0B7	6	%	100	-1
Швидкість коліс	28C	0-1	км/год	0	1/32
	28C	2-3	км/год	0	1/32
	29D	4-5	км/год	0	1/32
	29D	6-7	км/год	0	1/32

Оберти двигуна (RPM) є одним із найважливіших параметрів, що дозволяють зрозуміти загальний стан двигуна та його режим роботи. За допомогою CAN ID 01A, байта 2-3 та формули обчислення обертів двигуна з OBD-II можна швидко отримати значення RPM. Формула виглядає так:

$$RPM = \frac{(A \cdot 256) + B}{4} \quad (3)$$

де A та B – значення відповідних байтів.

Графіки аналізу даних OBD-II і CAN, змодельовані в MATLAB Simulink, представлені на рисунку 2. Зокрема на графіку 2а показано зміну значень другого байта даних OBD-II, що відповідає обертам двигуна (вгорі), та відповідного байта CAN (унизу) в залежності від часу. Наприклад, при значеннях A = 50 і B = 120:

$$RPM = \frac{(256 \cdot 50 + 120)}{4} = \frac{12920}{4} = 3230 \text{ об/хв}$$

Це високі оберти двигуна, що можуть бути характерними для інтенсивного прискорення або режиму високих навантажень. Графік 2а показує, що синхронні зміни в обертах у часі, зафіксовані через CAN і OBD-II, дозволяють забезпечити надійність отриманих даних. Така інформація важлива для C-ITS, оскільки високі оберти двигуна можуть вказувати на активний режим руху, що потребує підвищеної уваги до технічного стану автомобіля, особливо до системи охолодження.

Навантаження на двигун вказує, скільки потужності автомобіль використовує в конкретний момент. Використовуючи CAN ID 2F3, байт 3, з одиницями вимірювання у відсотках, можна обчислити навантаження

двигуна. Застосовуючи масштаб 4/5 та зсув -20, ми отримуємо формулу для розрахунку навантаження у відсотках:

$$L = (X \cdot \text{масштаб}) + \text{зсув} \quad (4)$$

де X – значення, отримане з байта 3 CAN-шини, що відповідає навантаженню на двигун.

Формула базується на загальноприйнятих методах аналізу CAN-даних у C-ITS та діагностиці, хоча параметри можуть змінюватися залежно від виробника [1,4,7].

На графіку 2b показано зміну швидкості у часі, отриману через OBD-II (угорі) та відповідні дані CAN-шини (унизу). Припустимо, байт 3 містить значення 90 (у десятковій системі):

$$L_{oad} = \left(90 \cdot \frac{4}{5}\right) - 20 = (72) - 20 = 52\%$$

Навантаження 52% означає, що двигун працює в умовах середнього навантаження, яке характерне для підтримки постійної швидкості. Графік 2b показує зміну швидкості у часі та її відповідність даним, отриманим через CAN, що дозволяє оцінити вплив цього параметра на навантаження двигуна. Такі дані є важливими для C-ITS, оскільки дозволяють оцінити ефективність роботи двигуна, рівень витрати палива та ймовірність перегріву у випадку високого навантаження.

Швидкість автомобіля є ще одним критичним параметром для оцінки стану транспортного засобу та його поведінки на дорозі. CAN ID для цього параметра – 1d2, байти 4-5, з масштабом 1/64, без зсуву.

На графіку 2c зображено зміну швидкості окремих коліс транспортного засобу у залежності від часу під час виконання маневру (різкого повороту). Зміни швидкості передніх і задніх коліс при маневруванні демонструють роботу системи стабілізації, яка контролює положення автомобіля на дорозі.

Середня швидкість розраховується з CAN-даних за формулою:

$$U_{avg} = (Byte_{high} \cdot 256 + Byte_{low}) \cdot \text{масштаб}$$

При значеннях байтів 0x19, 0x3c (25 і 60 у десятковій системі):

$$U_{avg} = (25 \cdot 256 + 60) \cdot \frac{1}{64} = 100.94 \text{ км/год}$$

Це середня швидкість для міських умов руху, що може свідчити про стабільний режим водіння. У випадках асинхронних змін швидкості передніх і задніх коліс система може виявити ризик втрати контролю, що особливо важливо при маневрах у складних дорожніх умовах, таких як дощ чи ожеледиця.

Положення педалі акселератора дозволяє визначити, наскільки інтенсивно водій натискає на педаль газу, що впливає на рівень прискорення та навантаження на двигун. CAN ID для цього параметра – 0b7, байт 6, з масштабом -1 і зсувом 100.

При значенні 50 у байті 4 положення педалі акселератора обчислюється:

$$TP_{pedal} = 100 - (40 \times 1) = 60\%$$

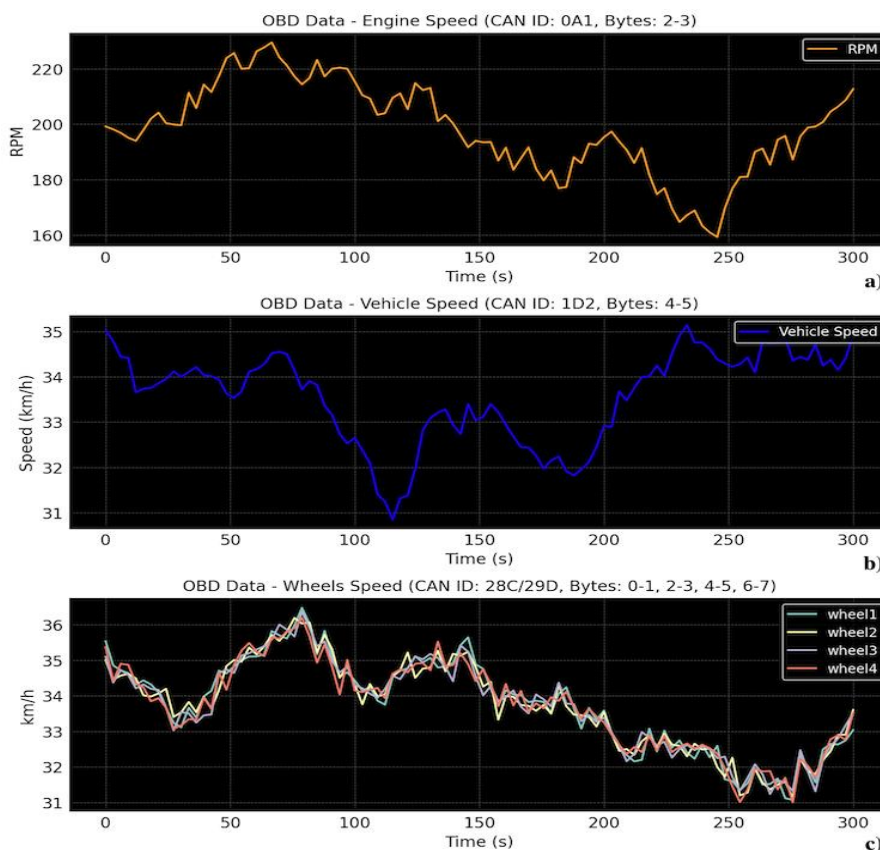


Рис. 2. OBD-II and CAN графіки аналізу даних

З розвитком інтелектуальних транспортних систем (C-ITS) зростає необхідність забезпечення надійного зв'язку між транспортними засобами та інфраструктурою (V2I), особливо у складних міських умовах, де сигнал може втрачатися через забудову, трафік і інші фактори [10,12].

Для оцінки якості каналу зв'язку V2I у реальному часі використовуються моделі GRU (Gated Recurrent

Unit) та VMD-BO-BiLSTM, (рис. 3) які забезпечують високу точність прогнозування в умовах міського середовища. Алгоритм GRU, завдяки своїм рекурентним властивостям, ефективно відстежує довготривалі залежності в часових даних, що дозволяє класифікувати якість каналу із точністю 97.5%. Основна схема роботи GRU передбачає використання параметрів мережі W і b , а також функцій активації $\sigma(\cdot)$ і $\tanh(\cdot)$ які забезпечують обробку вхідних даних для генерації прихованих станів.

Для покращення точності прогнозування використовується модель VMD-BO-BiLSTM, яка розкладає сигнал на модальні компоненти, виділяючи основні частотні складові. Алгоритм VMD зменшує складність сигналу, підвищуючи точність аналізу. Байєсова оптимізація (BO) ефективно налаштовує гіперпараметри BiLSTM, забезпечуючи точність прогнозування $R^2 = 0.9945$. Оцінка ефективності моделі проводиться за допомогою метрик RMSE, MAE та MAPE, які свідчать про надійність і високу точність алгоритму [13].

Поєднання моделей GRU та VMD-BO-BiLSTM дозволяє стабільно прогнозувати якість каналу зв'язку, оптимізуючи мережеві ресурси та мінімізуючи затримки. Модель може адаптуватися до різних умов, включаючи міське середовище, та високошвидкісні магістралі, забезпечуючи гнучкість і ефективність для систем C-ITS.

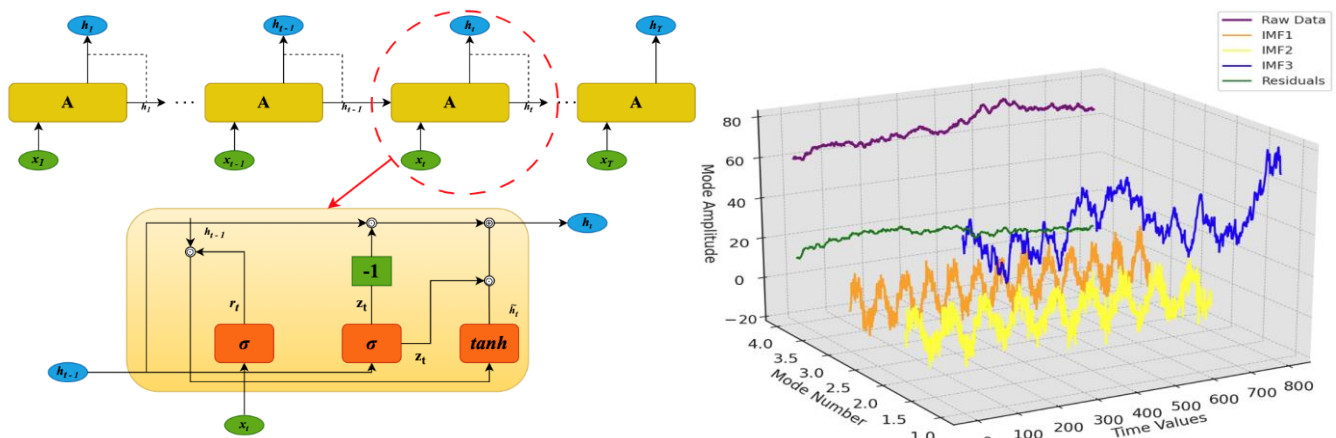


Рис. 3. Закритий рекурентний блок і VMD-BO-BiLSTM

Мобільні додатки у системах Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) відіграють центральну роль у забезпеченні інтеграції інформації між транспортними засобами, дорожньою інфраструктурою та іншими учасниками дорожнього руху. Їх використання дозволяє створити платформу для координації дій у реальному часі, що значно підвищує безпеку, ефективність і зручність дорожнього руху [8,15].

Ключовою функцією мобільних додатків є обробка і відображення повідомлень CAM (Cooperative Awareness Message), CPM (Collective Perception Message), IVIM (Infrastructure to Vehicle Information Message), DENM (Decentralized Environmental Notification Message) і HD-Map (High-Definition Map). Повідомлення CAM забезпечують інформацію про швидкість і напрямок руху транспортних засобів, тоді як CPM надають дані про об'єкти, виявлені радаром RSU, зокрема пішоходів, велосипедистів або перешкоди. IVIM дозволяє отримувати інформацію від інфраструктури, таку як обмеження швидкості чи зони ремонту. DENM надає сповіщення про потенційні небезпеки, наприклад, аварії або погані погодні умови, а HD-Map забезпечують точні карти з деталями дорожньої інфраструктури [9].

На екрані додатка (рис. 4) відображається інтерактивна карта, яка містить поточне місце розташування користувача, транспортні засоби, виявлені радаром RSU, та інші об'єкти. Об'єкти, визначені повідомленнями CPM, позначені синіми іконками, тоді як транспортні засоби — зеленими. За допомогою даних система розраховує швидкість об'єктів за формулою $v = \Delta d / \Delta t$, де Δd — зміна відстані між двома моментами часу, а Δt — часовий інтервал. Ця функція дозволяє виявляти критичні ситуації на дорозі, наприклад, раптові зміни руху, і оперативно інформувати водіїв.

Мобільний додаток, інтегрований у систему Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS), підтримує три основні режими роботи, кожен із яких адаптований для специфічних сценаріїв використання. Ці режими спрямовані на задоволення потреб різних категорій учасників дорожнього руху та операторів дорожньої інфраструктури.

Режим VRU (Вразливі учасники дорожнього руху).

Цей режим орієнтований на пішоходів і велосипедистів, які є найбільш вразливими учасниками дорожнього руху. Передача даних здійснюється через MQTT-брокер із використанням стільникового зв'язку, що забезпечує оперативний обмін інформацією. Мобільний додаток відображає дорожні події та транспортні засоби, які знаходяться поблизу користувача. Для оптимізації обсягу даних застосовується алгоритм квадродререва, який дозволяє підписуватися лише на інформацію, що покриває поточне місцезнаходження користувача. Це значно знижує обчислювальні витрати та підвищує ефективність роботи додатка в умовах високої мобільності.

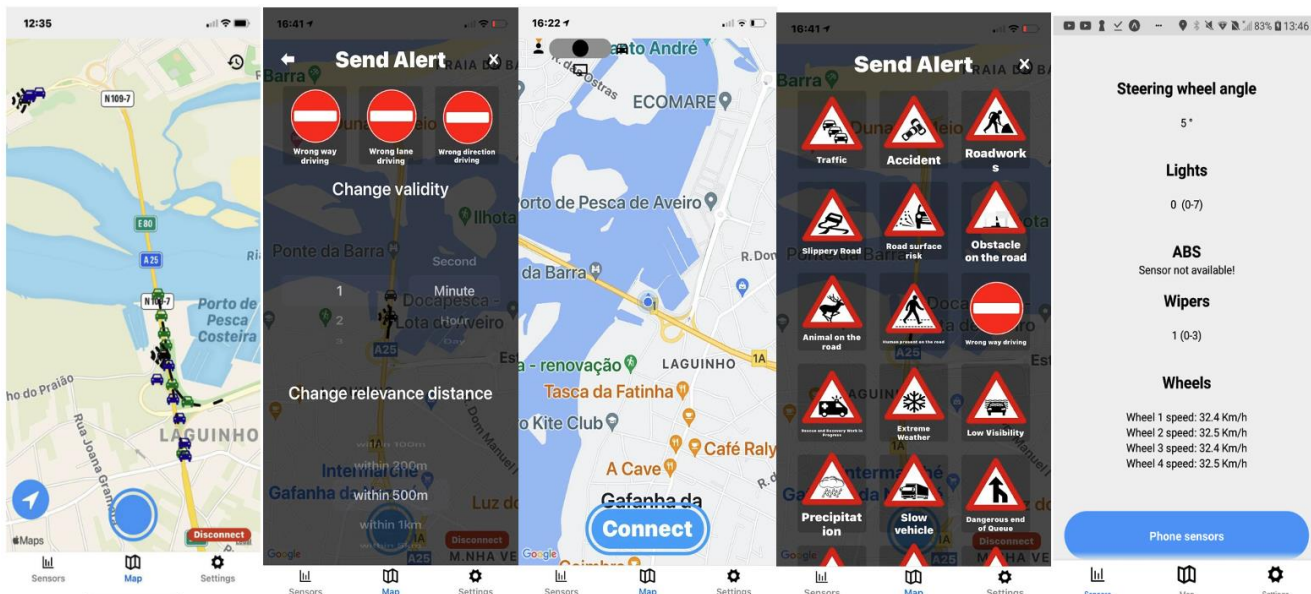


Рис. 4. Візуалізація даних CAM, CPM, IVIM і HD-Map в мобільному додатку

Режим ТСС (Центр управління дорожнім рухом).

У цьому режимі мобільний додаток виконує функцію інструменту для операторів дорожньої інфраструктури. Смартфон отримує всі доступні повідомлення, використовуючи ідентифікатор центральної станції, що дозволяє забезпечити централізований моніторинг дорожньої ситуації. Оператори отримують доступ до даних про поточний стан руху, включаючи повідомлення CAM (Cooperative Awareness Message), CPM (Collective Perception Message) та IVIM (Infrastructure to Vehicle Information Message). Це дозволяє створювати комплексну картину дорожньої ситуації, підтримуючи прийняття оперативних управлінських рішень.

Режим OBU (Бортовий блок транспортного засобу).

Цей режим орієнтований на водіїв транспортних засобів і забезпечує їх актуальною інформацією про дорожні умови, транспортні засоби поблизу, а також про події на дорозі. Мобільний додаток у цьому режимі не лише відображає інформацію, але й збирає дані з сенсорів транспортного засобу, які надалі передаються до системи C-ITS. Це сприяє формуванню інтерактивної дорожньої екосистеми, де інформація постійно оновлюється та обмінюється в реальному часі.

Досліджені режими роботи мобільного додатка демонструють його гнучкість та адаптивність до різних сценаріїв використання, забезпечуючи інтеграцію різних учасників дорожнього руху у єдину кооперативну систему. Це сприяє підвищенню безпеки та ефективності дорожнього руху, оптимізуючи його в умовах динамічного середовища [14].

5. Висновки

Забезпечення стабільності та безпеки кооперативних інтелектуальних транспортних систем (C-ITS) є критично важливим завданням для підвищення ефективності дорожнього руху та мінімізації ризиків на дорогах. Реалізація ефективних методів збору, аналізу та синхронізації даних у реальному часі сприяє своєчасному виявленню критичних ситуацій та інформуванню учасників дорожнього руху.

Використання алгоритмів кореляції Пірсона та лінійної інтерполяції забезпечує узгодженість параметрів автомобіля з різними частотами вибірки, що дозволяє підвищити точність оцінки стану транспортного засобу. Ідентифікація небезпечних маневрів, таких як різкі зміни швидкості або маневрування, сприяє швидкому реагуванню на потенційні загрози.

Інтеграція технологій OBD-II та CAN для отримання таких ключових параметрів автомобіля як оберти двигуна, швидкість і положення педалі акселератора дає змогу покращити прогнозування небезпечних ситуацій та оптимізувати роботу транспортних систем.

Використання моделей GRU та VMD-BO-BiLSTM для аналізу якості каналу V2I в умовах міської забудови дозволяє підвищити точність прогнозування та забезпечити стабільність зв'язку між транспортними засобами й інфраструктурою навіть у складних умовах. Інтеграція мобільних додатків, що відображають повідомлення CAM, CPM, IVIM та HD-Map, створює умови для ефективного обміну інформацією в реальному часі, сприяючи підвищенню безпеки на дорогах.

Комплексний підхід до впровадження C-ITS, який поєднує сучасні алгоритми обробки даних, мобільні додатки та прогнозувальні моделі, забезпечує покращення якості інформаційного обміну та стабільності транспортних мереж.

Подяка

Автори висловлюють вдячність співробітникам кафедри інформаційно-вимірювальних технологій за допомогу в

Конфлікт інтересів

Автори не мають претензій один до одного.

Список використаної літератури

- [1] David Rocha, Gil Teixeira, Emanuel Vieira, João Almeida, Joaquim Ferreira. A Modular In-Vehicle C-ITS Architecture for Sensor Data Collection, Vehicular Communications and Cloud Connectivity. *Sensors*, 2023, Vol. 23(3), 1724, pp. 1-33 <https://doi.org/10.3390/s23031724>
- [2] Shengli Pang, Zekang Li, Ziru Yao, Honggang Wang, Weichen Long and Ruoyu Pan. Research on the Evaluation and Prediction of V2I Channel Quality Levels in Urban Environments. *Electronics*, 2024, Vol. 13(5), 911, pp. 1-25, <https://doi.org/10.3390/electronics13050911>
- [3] Syed Adnan Yusuf, Arshad Khan, Riad Souissi. Vehicle-to-everything (V2X) in the autonomous vehicles domain – A technical review of communication, sensor, and AI technologies for road user safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2024, Vol. 23, 100980, pp. 1-23, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100980>
- [4] Juan Guerrero-Ibáñez, Sherali Zeadally and Juan Contreras-Castillo. Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. *Sensors*, 2018, Vol. 18(4), 1212, pp. 1-24, <https://doi.org/10.3390/s18041212>
- [5] Tanzina Afrin and Nita Yodo. A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System, *Sustainability*, 2020, Vol. 12(11), 4660, pp. 1-23, <https://doi.org/10.3390/su12114660>
- [6] Jian Wang, Yameng Shao, Yuming and Rundong Yu. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing. *Sensors*, 2019, Vol. 19(3), 334, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s19020334>
- [7] Gabriel Gomes de Oliveira, Yuzo Iano, Gabriel Caumo Vaz, Kannadhasan Suriyan. Data collection and analysis applied to intelligent transportation systems: a case study on public transportation. *Discover Artificial Intelligence*, 2023, 44163, Vol. 3(13), pp. 1-14, <https://doi.org/10.1007/s44163-023-00059-3>
- [8] Maximilian Bauder, Robin Langer, Tibor Kubjatko, Hans-Georg Schweiger. Post-Processing Kalman Filter Application for Improving Cooperative Awareness Messages Position Data Accuracy, *Sensors*, 2024, Vol. 24(24), 7892, pp. 1-21 <https://doi.org/10.3390/s24247892>
- [9] Babak Ebrahimi Soorchaei, Mahdi Razzaghpour, Rodolfo Valiente, Arash Raftari, Yaser Pourmohammadi Fallah. High-Definition Map Representation Techniques for Automated Vehicles. *Electronics*, 2022, Vol. 11(20), 3374, pp. 1-16, <https://doi.org/10.3390/electronics11203374>
- [10] Xuan Zhou, Ruimin Ke, Hao Yang, Chenxi Liu. When Intelligent Transportation Systems Sensing Meets Edge Computing: Vision and Challenges. *Appl. Sci*, 2021, Vol. 11(20), 9680, pp. 1-28, <https://doi.org/10.3390/app11209680>
- [11] Jinhwan Jang. Pavement slipperiness detection using wheel speed and acceleration sensor data. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, Vol. 11, 100431, pp 1-9 <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100431>
- [12] S. Strobl, M. Klöppel-Gersdorf, T. Otto and J. Grimm. C-ITS pilot in Dresden—Designing a modular C-ITS architecture. *Proc. 6th Int. Conf. Models Technol. Intell. Transp. Syst.* 2019, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883376>
- [13] Eui-Jin Kim, Ho-Chul Park, Seung-Young Kho, Dong-Kyu Kim. A Hybrid Approach Based on Variational Mode Decomposition for Analyzing and Predicting Urban Travel Speed. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, Vol. 2019, 3958127, pp. 1-12 <https://doi.org/10.1155/2019/3958127>
- [14] Maria Pomoni. Exploring Smart Tires as a Tool to Assist Safe Driving and Monitor Tire-Road Friction. *Vehicles*, 2022, Vol. 4(3), pp. 744–765, <https://doi.org/10.3390/vehicles4030042>
- [15] Natalia Sobrino, Fernando Romero. Impact Assessment of Cooperative Intelligent Transport Systems: Andalusian Mediterranean Pilot. *Transportation Research Procedia*, 2023, Vol. 72, pp. 775–782, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.467>