

А. А. Коваленко, Р. О. Ярошевич

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТРАНЗАКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ТАКТИЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ

Анотація. Актуальність. Тактильний Інтернет – це одна з основних технологій, що визначає чергову еволюцію мережі Інтернет, яка дозволяє передавати тактильні відчуття в режимі реального часу. Транзакція є основною процесу комунікації та обслуговування в Тактильному Інтернеті та використовується для передачі даних між різними вузлами в мережі. Моделюючи процес обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі, можна спрогнозувати продуктивність роботи за різних сценаріїв і визначити області для подальшого вдосконалення. Це надасть змогу забезпечити надійність та доступність, а також низьку затримку у вузлах мережі Тактильного Інтернету. **Метою даної роботи** є моделювання процесу обробки транзакцій для забезпечення надійності, доступності та низької затримки при передачі даних у середовищі Тактильного Інтернету. **Об’єктом дослідження** є процес обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету. **Предметом дослідження** є методи оптимізації архітектури Тактильного Інтернету. **Результати.** В даній статті описані кроки процесу обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі, включаючи збір даних, аналіз і генерацію команд керування. Розглянуто основні складові архітектури Тактильного Інтернету, а саме ведучий, ведений та мережний домени, і пропонується використання програмно-конфігурованих мереж для керування мережним трафіком та підвищення продуктивності мережі Тактильного Інтернету. Крім того, розглядаються питання масштабування ресурсів, на основі тривірневої архітектури Тактильного Інтернету та зменшення кількості керованих інтелектуальних контролерів з використанням протоколу OpenFlow. **Висновок.** Розглянута модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету здатна забезпечити тактильний зворотний зв’язок з низькою затримкою та покращити ефективність мережі, що буде мати позитивний вплив на взаємодію з користувачем і дозволить створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність.

Ключові слова: Тактильний Інтернет, хмарна інфраструктура, транзакція, контролер, SDN, MEC, NFV, OpenFlow

Вступ

Швидкий розвиток сучасних мережних технологій призвів до значного розвитку і поширення Тактильного Інтернету (ТІ), нової парадигми взаємодії людини та машини.

Тактильний Інтернет – це одна з основних технологій, що визначає чергову еволюцію мережі Інтернет, яка дозволяє передавати тактильні відчуття в режимі реального часу так само, як раніше це було з передачею мови та відео.

Ключова проблема Тактильного Інтернету полягає в тому, щоб забезпечити точний і послідовний тактильний зворотний зв’язок у режимі реального часу через комп’ютерну мережу.

Процес обробки транзакцій у Тактильному Інтернет-середовищі включає складну взаємодію між тактильними датчиками, тактильними приводами, мережною інфраструктурою та алгоритмами керування.

Такий процес включає етапи збору даних, обробки сигналу, передачі, контроль зворотного зв’язку, виправлення помилок, інтерполяцію та згладжування.

Мета полягає в тому, щоб забезпечити тактильний зворотний зв’язок вимогам точності в режимі реального часу, який покращує взаємодію з користувачем і дозволяє створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність, тощо.

Метою цієї роботи є моделювання процесу обробки транзакцій для забезпечення надійності, доступності та низької затримки при передачі даних у середовищі Тактильного Інтернету.

Аналіз процесу обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету

Тактильний Інтернет складається з мережних пристроїв, які з’єднані між собою через високошвидкісні канали зв’язку з малою затримкою. Він призначений для забезпечення контролю в реальному часі та зв’язку між людьми та машинами. Транзакція є основою процесу комунікації та обслуговування в Тактильному Інтернеті та використовується для передачі даних між різними вузлами в мережі. Процес обробки транзакцій має вирішальне значення для ефективного функціонування Тактильного Інтернету та складається з наступних кроків, які показані на рис. 1.



Рис. 1. Процес обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету

Першим кроком є збір даних від датчиків і приводів, які підключені до мережі Тактильного Інтернету.

ету. Ці дані представляють фізичні властивості та стан об'єктів, що контролюються. Зібрані дані передаються через мережу на центральний процесор для аналізу. Цей крок передбачає моделювання швидкості передачі, затримки та надійності мережі. Після того, як тактильні дані були зібрані, вони аналізуються для забезпечення їх точності і перетворення у формат, який можна передавати через Інтернет. Цей процес виконується серією алгоритмів і математичних моделей, які призначені для виконання конкретних завдань, таких як стиснення даних, виправлення помилок і обробка сигналів.

За результатами аналізу даних центральний процесор формує команди керування для виконавчих механізмів. Цей крок передбачає моделювання процесу прийняття рішень, включаючи оцінку компромісів і вибір найкращої стратегії контролю. Команди керування передаються по мережі до приводів, які виконують бажаний рух або дію, що передбачає моделювання часу відгуку та точності приводів. Постійно контролюється стан об'єктів та мережі, відповідно коригується стратегія керування. Цей крок передбачає моделювання циклу зворотного зв'язку, включаючи час відгуку, точність та надійність. Моделюючи процес обробки транзакцій, можна спрогнозувати продуктивність мережі ТІ за різних сценаріїв і визначити області для покращення. Це може допомогти оптимізувати архітектуру та підвищити загальну ефективність та надійність, оцінити масштабованість мережі ТІ та її здатність обробляти великі обсяги даних і складні контрольні завдання. Крім того, це дасть змогу моделювання різних умов мережі, таких як перевантаження, збої та загрози безпеці, щоб оцінити стійкість і безпеку мережі ТІ.

З точки зору техніки моделювання, залежно від складності та специфіки побудови мережі ТІ можуть бути використані різні засоби моделювання та математичні моделі. Наприклад, моделювання дискретних подій, теорія масового обслуговування та Марківські моделі зазвичай використовуються для моделювання продуктивності складних технологій.

Методи оптимізації архітектури Тактильного Інтернету

Архітектура мережі ТІ складається із трьох доменів: ведучого, веденого та мережного. Основна проблема, з якою стикається перевірка мережного домену – це затримка в 1 мс.

У джерелі [1] для побудови мережного домену пропонується використання нових технологій, таких як програмно-конфігуровані мережі (Software Defined Network, SDN), віртуалізація мережних функцій (Network Functions Virtualization, NFV) та мобільні граничні обчислення (Mobile Edge Computing, MEC) [2]. Програмно-конфігурована мережа SDN – це метод адміністрування комп'ютерних мереж, що дозволяє керувати послугами мережі, коли функціонал управління (control plane) відокремлений від рівня пересилки пакетів (data plane). Планування мережі та управління трафіком при цьому відбувається програмним шляхом. Віртуалізація мережних функцій NFV – це технологія віртуалізації фізичних мережних елементів

телекомунікаційної мережі, коли мережні функції виконуються програмними модулями, які працюють на стандартних серверах і віртуальних машинах в них. SDN та NFV в концепції Тактильного Інтернету – це поділ функцій керування мережею, потоком трафіку та функцій комутації пакетних даних. Функції розрахунку топології мережі та таблиць маршрутизації трафіку виконуються на окремому пристрої – контролері мережі.

Функції комутації та маршрутизації пакетів виконуються на мережному устаткуванні, яке підтримує завантаження таблиць комутації з центрального мережного контролера, зазвичай із використанням протоколу OpenFlow, що дозволяє масштабувати ресурси, необхідні для керування трафіком.

Крім того, централізація рівня керування знижує кількість керованих інтелектуальних пристроїв, полегшує роботу мережі та надання послуг. OpenFlow протокол має низьку ефективність у термінах масштабованості мережі для великих мереж [3]. Однак ця проблема може бути вирішена використанням окремих OpenFlow-мереж у різних областях мережі та балансуванням навантаження [4].

Програмно-конфігурована мережа SDN дає можливість розділити рівень керування та рівень передачі даних, що надає наступні нові можливості:

- 1) спрощення адміністрування та гнучкості мережі;
- 2) спрощення апаратної частини;
- 3) зменшення кругової затримки та надійність мережі;
- 4) можливість впровадження інновацій;
- 5) висока ефективність мережі.

Одним з важливих чинників, які впливають на значення затримки, є число мережних вузлів. Кількість вузлів, що беруть участь у процесі забезпечення взаємодії між користувачами повинно бути якнайменше та рівномірно розташованими. Мобільні граничні обчислення є однією з ключових можливостей щодо забезпечення таких вимог. Концепція MEC поєднує у собі переваги трьох технологій: мобільного інтернету, мобільних обчислень та хмарних обчислень [5] та може надати багато нових можливостей, насамперед наступних:

- 1) зменшення затримки при передачі даних;
- 2) збільшення смуги пропускання;
- 3) ефективне вивантаження трафіку з ядра мережі.

Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету

Надання послуг Тактильного Інтернету вимагає від мережі надійності та доступності, а також низької затримки при передачі даних та при обробці заявок. Це накладає обмеження на компоненти мережі ТІ з погляду контексту, контенту та мобільності. В даній статті реалізація моделі процесу обробки транзакцій, заснована на взаємодії вузлів мережі Тактильного Інтернету та будується з використанням технологій MEC, SDN та NFV.

Трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі ТІ зображена на рис. 2.

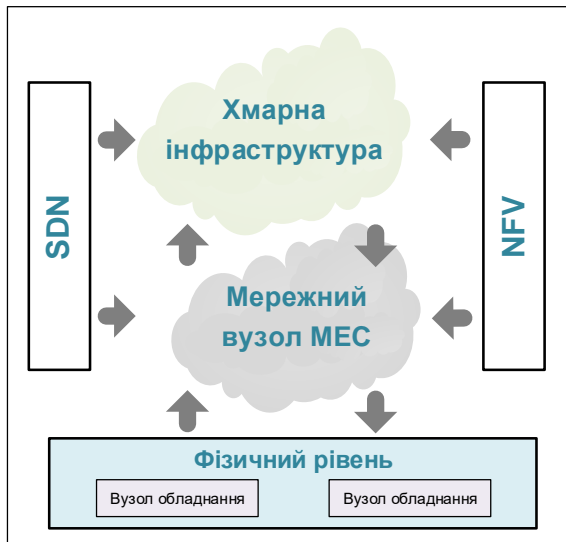


Рис. 2. Трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі ТІ

Трирівнева архітектура складається із фізичного рівня, який являє собою вузол обладнання; другого рівня – набір граничних вузлів, які обслуговують пристрої першого рівня та третього рівня – хмарна інфраструктура, яка є головною та включає інтеграцію різних протоколів. У мережі ТІ розгортається єдиний централізований фізичний контролер SDN, який контролює та керує розподіленими вузлами MEC, розподіленими комутаторами, а також пристроями ТІ. Розподілена програмно-конфігурована мережа SDN дозволяє програмувати MEC-вузли та пристрої ТІ, а також керувати ними через інтерфейси прикладного програмування (API). Мережа Тактильного Інтернету в цілому пов'язана за допомогою комутаторів OpenFlow, які управляють пакетами даних та перенаправляють трафік відповідно до маршрутних таблиць. Проміжні пристрої є стандартним обладнанням, яке може бути надано мережним операторам з можливістю використовувати додаткові функції, такі як міжмережний екран та трансляція мережних адрес. Основними вимогами до функцій та послуг, що надаються цими проміжними пристроями, є ефективне використання ресурсів та захист мережі від атак. Всі ці елементи відносяться до рівня передачі ме-

режі. Важливу роль в даній архітектурі також грає центральний контролер SDN, який є рівнем керування мережею. На основі логіки програмування та керування він може виконувати функції та операції на рівні керування. Також він має і підтримує в актуальному вигляді глобальну інформацію про граничні пристрої та пристрої ядра мережі: комутатори OpenFlow, комутатори доступу, проміжні пристрої, мережі радіодоступу (Radio Access Network, RAN) і хмарні пристрої та платформи. Керує всіма периферійними пристроями та пристроями ядра мережі, які прописані у протоколі OpenFlow.

Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету показано на рис. 3. Взаємодія вузлів мережі ТІ в даній моделі відбувається в декілька кроків. Першим кроком є автентифікація, оскільки вузол ведучого домену має бути авторизований. Тому він, за допомогою хмари, зв'язується безпосередньо з веденим доменом для авторизації. Потім хмара виконує процес аутентифікації та ідентифікує пристрій, що авторизується. Наступним кроком є визначення адреси, при якій хмара звертається до ведучого домену, щоб визначити його місцезнаходження. Для цього ведучий домен звертається до оркестратора SDN, який ініціалізує пошук пристрою та заповнює таблицю маршрутизації різними шляхами маршрутизації між вузлом ведучого домену та хмарою та знаходить усі комутатори, призначені для цього зв'язку. Контролер SDN дозволяє комутаторам виконувати деякі завдання обробки та обчислення даних, що пересилаються ведучим доменом після рівня MEC.

Контролер SDN оцінює комутатори із доступними ресурсами після перевірки певних параметрів:

- 1) транзитний трафік;
- 2) трафік доступу;
- 3) тип доступу до трафіку;
- 4) обмеження часу затримки;
- 5) обчислювальна потужність для обслуговування даних.

Контролер SDN визначає можливість включення даних, переданих до базової мережі через рівень туману, до складу доступних ресурсів комутаторів, оптимізуючи попередні параметри, і, таким чином, інформує обрані комутатори.

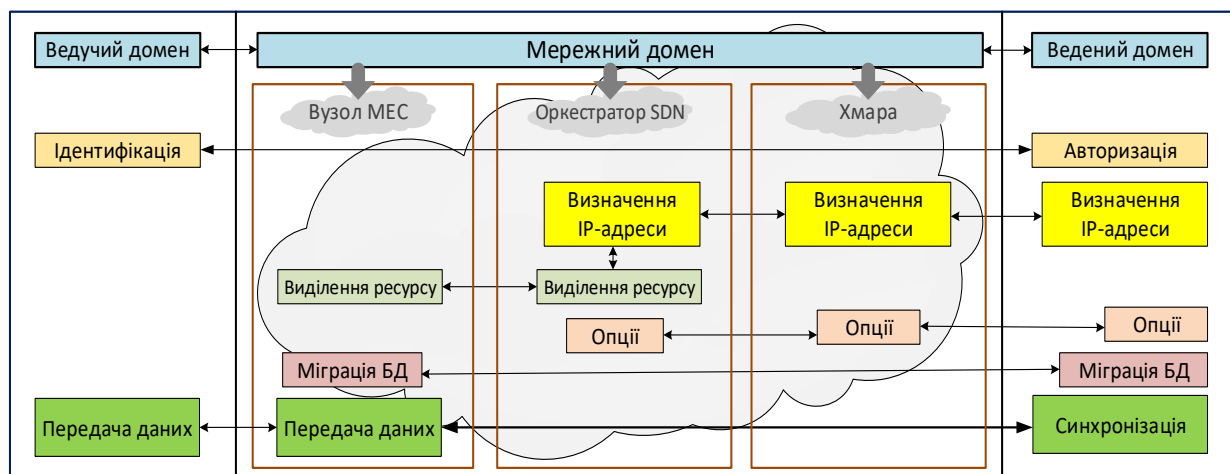


Рис. 3. Модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету

Оркестратор створює віртуальну машину на вибраних комутаторах, які використовуються для обробки даних. Наступним кроком є міграція бази даних. Хмара через постачальника послуг переносить базу даних через певні комутатори. Мережа продовжує працювати, а комутатори агрегують та синхронізують дані ведучого домену з хмарою та веденим доменом.

Висновки

В результаті проведених досліджень були запропоновані кроки процесу обробки транзакцій у середовищі Тактильного Інтернету, включаючи збір даних, аналіз і генерацію команд керування. У даній статті була представлена трирівнева архітектура взаємодії вузлів мережі Тактильного Інтернету з використанням технологій MEC, SDN та NFV що дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів та захист мережі ПІ від атак. Зокрема, розгортається

єдиний централізований фізичний контролер SDN, який контролює та керує розподіленими вузлами MEC, розподіленими комутаторами, а також пристроями ПІ. Розподілена програмно-конфігурована мережа SDN дозволяє програмувати MEC-вузли та пристрої ПІ, а також керувати ними через інтерфейси прикладного програмування. Також у мережі використовуються комутатори OpenFlow, які управляють пакетами даних та перенаправляють трафік відповідно до маршрутних таблиць. Розглянута модель процесу обробки транзакцій в середовищі Тактильного Інтернету здатна забезпечити тактильний зворотний зв'язок з низькою затримкою та покращити ефективність мережі, що буде мати позитивний вплив на взаємодію з користувачем і дозволить створювати нові програми та сценарії в таких сферах, як медицина, робототехніка, віртуальна та доповнена реальність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fanibhare, Vaibhav, Nurul I. Sarkar, and Adnan Al-Anbuky. 2021. "A Survey of the Tactile Internet: Design Issues and Challenges, Applications, and Future Directions" *Electronics* 10, no. 17: 2171. <https://doi.org/10.3390/electronics10172171>
2. Ярошевич Р.О., Аналіз технологій підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах / Ярошевич Р.О., Коваленко А.А., // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 1 (67). – С. 106-110. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.106>.
3. Shalimov, A. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers / Shalimov, A.; Zuikov, D.; Zimarina, D.; Pashkov, V. and Smeliansky, R. // in Proc. the 9th central & eastern european software engineering conference, 2013. Кучук Г.А., Можаяев О.О., Воробйов О.В. (2006), "Аналіз та моделі самоподібного трафіка", *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9(35), С. 173-180.
4. Blial, O. An overview on SDN architectures with multiple controllers / Blial, O.; Mamoun, M. and Benaini, R. // *Journal of Computer Networks and Communications*, 2016.
5. Gai, K. Dynamic energy-aware cloudlet-based mobile cloud computing model for green computing / Gai, K.; Qiu, M.; Zhao, H.; Tao, L. and Zong, Z. // Elsevier, *Journal of Network and Computer Applications*, 59, pp.46-54, Jan.2016.
6. Yonghong, F. A dormant multi-controller model for software defined networking / Yonghong, F.; Jun, B.; Jianping, W.; Ze, C.; Ke, W. and Min, L. // *China Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 45–55, Mar. 2014.
7. Farshin, A. A chaotic grey wolf controller allocator for Software Defined Mobile Network (SDMN) for 5th generation of cloud-based cellular systems (5G) / Farshin, A. and Sharifian, S. // *Computer Communications*, vol. 108, pp. 94–109, Aug. 2017.
8. Muhizi, S. Analysis and performance evaluation of SDN queue model / Muhizi, S.; Shamshin, G.; Muthanna, A.; Kirichek, R.; Vladyko, A. and Koucheryavy, A. // In Proc. International Conference on Wired/Wireless Internet Communication, Springer, Cham, Jun 2017, pp. 26–37.

Received (Надійшла) 17.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

Modelling of the transaction processing process in a Tactile Internet environment

Andriy Kovalenko, Roman Yaroshevych

Abstract. Topicality. Tactile Internet is one of the main technologies that determines the next evolution of the Internet, which allows you to transmit tactile sensations in real time. A transaction is at the core of the communication and service process in the Tactile Internet and is used to transfer data between different nodes in the network. By modeling the transaction processing process in the Tactile Internet environment, you can predict the performance of the work under different scenarios and identify areas for further improvement. This will make it possible to ensure reliability and availability, as well as low latency in the nodes of the Tactile Internet network. **The goal of this work** is to model the process of processing transactions to ensure reliability, availability and low latency during data transmission in the Tactile Internet environment. **The object of research** is the process of processing transactions in the Tactile Internet environment. **The subject of research** is methods of optimizing the Tactile Internet architecture. **Results.** This article describes the steps in the transaction processing process in the Tactile Internet environment, including data collection, analysis, and generation of control commands. The main components of the Tactile Internet architecture, namely host, slave, and network domains, are reviewed, and the use of software-configurable networks is proposed to manage network traffic and improve the performance of the Tactile Internet network. In addition, the issues of scaling resources based on the three-level architecture of the Tactile Internet and reducing the number of managed intelligent controllers using the OpenFlow protocol are considered. **Conclusions.** The considered model of the transaction processing process in the Tactile Internet environment is capable of providing low-latency tactile feedback and improving network efficiency, which will have a positive impact on user interaction and enable the creation of new applications and scenarios in fields such as medicine, robotics, virtual and augmented reality.

Keywords: Tactile Internet, Cloud Infrastructure, Transaction, Controller, SDN, MEC, NFV, OpenFlow.