

Р. О. Ярошевич, А. А. Коваленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Аналіз технологій підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах

Анотація. Метою даної роботи є проведення аналізу технологій які зможуть забезпечити підвищення ефективності Тактильного Інтернету (ТІ) у комп'ютерних мережах. Концепція ТІ набула свого розвитку завдяки появі та розвитку технологій, що вимагають досить малої затримки при доставці даних. Це насамперед послуги з певними вимогами до інтерактивності. Зокрема, це можуть бути різноманітні системи управління, пов'язані з передачею тактильних відчуттів від виконавчих механізмів і сенсорів на органи управління. Для підвищення ефективності ТІ сьогодні розглядається низка перспективних технологій, наприклад, технологія взаємодії пристрій-пристрій, D2D (Device-to-Device), без використання базової станції, що дозволяє ефективно побудувати надщільні комп'ютерні мережі. Для побудови мереж з малими затримками великого значення набувають технології типу MEC (Mobile Edge Computing), програмно-конфігурованих мережах SDN (Software Defined Networks) та віртуалізації мережних функцій NFV (Network Functions Virtualization). Комп'ютерні мережі з низькими затримками, в основі яких лежить концепція Тактильного Інтернету, мають велике значення при виборі методу побудови комп'ютерних мереж. В даній статті розглянуто різні технології та проаналізовані основні переваги та проблеми означених технологій, які вимагають подальшого їх дослідження.

Ключові слова: Тактильний Інтернет, комп'ютерна мережа, віртуалізації мережних функцій, програмно-конфігуровані мережі.

Вступ

Тактильний Інтернет, як частина глобальної мережі, повинна поєднувати у собі наднизьку затримку передачі даних водночас з високою доступністю, надійністю та безпекою. Так, ключовою особливістю, яка відрізняє Тактильний Інтернет, є підвищена доступність надійних високошвидкісних з'єднань через мобільний та широкосмуговий доступ до мережі із надзвичайно малим терміном очікування в обох напрямках [1]. Технологія Тактильного Інтернету є наступним щаблем розвитку Інтернету речей, що передбачає передачу не лише звукових та відео даних, а й еквівалент людських дотиків, рухів, дій. Наприклад, з його допомогою можна вчити малювати, грати на музичних інструментах, робити віддалені хірургічні операції, тобто все, що вимагає навичок «дрібної моторики».

Відповідно, реалізація такої ідеї вимагає побудови концепцій нових надщільних мереж, що забезпечують підключення набагато більшої кількості пристроїв та забезпечення низької затримки. Прикладом такої мережі може бути мережа 5G, що ще розробляється і тестується в даний час. Саме мережі зв'язку п'ятого покоління не тільки змінили погляд на розвиток комп'ютерних мереж в цілому, але й привели до появи цілого ряду нових напрямків в науково-дослідних роботах в галузі комп'ютерних систем та мереж [2].

Принцип Тактильного Інтернету можна розглядати як тришарову систему, засновану на структурі мережі 5G (рис. 1). У цій структурі розділені апаратне та програмне забезпечення, а для сумісності послуг на рівні програм використовуються інтерфейси прикладного програмування (API) [3].

Перший рівень – це рівень апаратних ресурсів, який включає інфраструктуру мережі із необхідними граничними хмарами, на другому рівні встановлюється програмне забезпечення, тут же розміщу-

ються бібліотеки для всіх функцій, необхідних у мережі. Ці бібліотеки є програмними функціями та модулями, які можна використовувати у необхідному місці мережі. Крім того, на цьому рівні розміщуються параметри радіодоступу та інші установки, необхідні для конфігурації мережі. І, нарешті, прикладний рівень, на якому визначено сервіси та програми, необхідні системним операторам мережі.

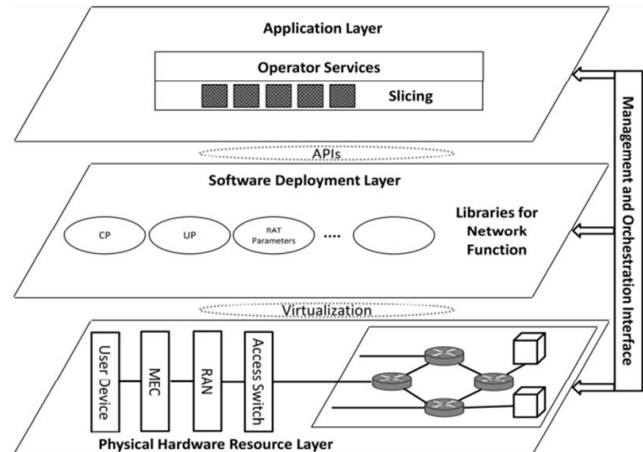


Рис. 1. Основні рівні системи Тактильного Інтернету

Три рівні системи пов'язані через інтерфейс управління системою та оркестрування. Цей інтерфейс відповідає за керування роботою перших двох рівнів. Інтерфейс керування та оркестрування підключений до першого рівня через API для виконання завдань, налаштування системи та моніторингу стану та продуктивності. Програмне забезпечення та параметри другого рівня також можуть бути обрані у будь-який час керуючим інтерфейсом через API. Взаємодія між прикладним рівнем та інтерфейсом управління та оркестрування дозволяє інтерфейсу вибирати відповідний мережний кластер для кожної програми або зіставляти його з існуючим кластером.

Мета статті – провести аналіз технологій забезпечення підвищення ефективності Тактильного Інтернету у комп'ютерних мережах, виявити основні переваги і проблеми даних технологій для подальшого їх дослідження та впровадження, а також вплив факторів на зниження ефективності ТІ.

Аналіз сучасних технологій реалізації концепції Тактильного Інтернету

Комп'ютерні мережі з низькими затримками, в основі яких лежить концепція Тактильного Інтернету, мають велике значення при виборі методу побудови комп'ютерних мереж. Реалізація концепції Тактильного Інтернету можлива тільки за умови впровадження нових технологій, наприклад:

- технології програмно-комутованих мереж SDN (Software Defined Networks);
- технології віртуалізації мережних функцій NFV (Network Functions Virtualization);
- мобільних граничних обчислень MEC (Mobile Edge Computing);
- технології MIMO (Multiple Input Multiple Output);
- технології взаємодії пристрій-пристрій D2D (Device-to-Device).

Використання технологій NFV та SDN дозволяє поділити мережу на віртуальні шари або сегменти і, таким чином, спрощує управління кожним із них та мережею в цілому. При цьому кожен сегмент відповідає за надання певної послуги та налаштований для її ефективної роботи. В результаті одна фізична мережа забезпечує надійне функціонування різних послуг з власними налаштуваннями, а оператор має можливість здійснювати окреме управління

кожним шаром або встановлювати однакові управлінські налаштування для декількох шарів одночасно. Це дозволить зменшити варіації затримок, що є однією з головних вимог до Тактильного Інтернету. Таким чином, спільне застосування технологій SDN та NFV забезпечить конвергенцію не лише на рівні сервісів, а й на рівні інфраструктури [5].

Технологія MEC полягає у перенесенні обчислень, пов'язаних з трафіком та сервісами, з централізованої хмари на границю мережі та ближче до клієнтів. Гранична область мережі аналізує, обробляє та зберігає дані замість того, щоб відправляти їх у хмару для обробки. Збір та обробка даних ближче до клієнтів знижує затримку та підвищує продуктивність у реальному часі для додатків з високою пропускнуною спроможністю. Зазвичай, MEC розгортаються за допомогою центрів обробки даних, що знаходяться на межі мережі. Для додатків на межі мереж потрібна висока пропускну здатність та низька затримка. Для цього постачальники послуг створюють розподілені центри обробки даних або розподілені хмари. Ресурси, що становлять хмару, можуть бути де завгодно: від централізованого центру обробки даних (ЦОД) до вузла стільникового зв'язку, центрального офісу, вузла агрегування, міського ЦОД або на території клієнта. Технологія MEC дозволяє виконувати розподілені граничні обчислення, опрацьовуючи контент на межі за допомогою сервера або хмарного абонентського обладнання. Більшість проектів із граничними обчисленнями розробляються за допомогою обладнання та програмних засобів з відкритим вихідним кодом, які використовують парадигми хмари та віртуалізації, включаючи SDN та NFV (рис. 2).

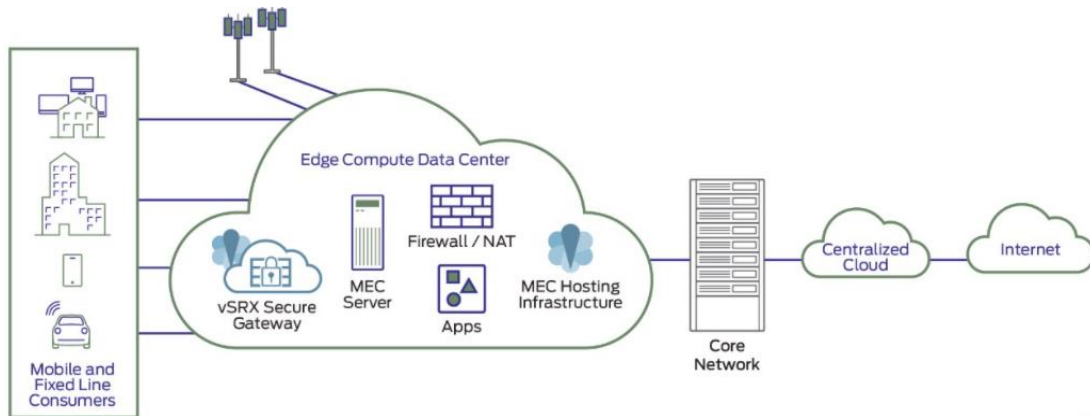


Рис. 2. Схема граничних обчислень з множинним доступом (MEC)

Технологія MIMO – це технологія просторового кодування сигналу, який дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при передачі та отриманні даних, за рахунок систем з декількома антенами (рис. 3). Приймальні та передавальні антени розміщують таким чином, щоб кореляція між сусідніми антенами була досить слабкою. Застосування технології MIMO вирішує питання підвищення швидкості передачі при просторовому мультиплексуванні та покращення якості зв'язку за рахунок просторово-тимчасового/частотного кодування або формування променів.

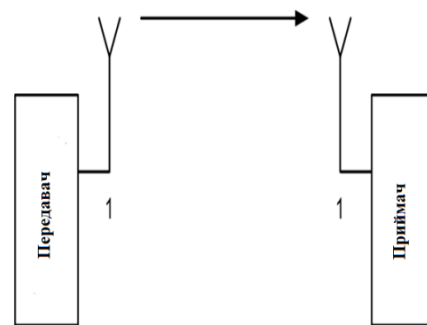


Рис. 3. Схема технології MIMO

Перебуваючи між передавачем та приймачем, сигнал може проходити багато шляхів. Крім того, переміщуючи антени навіть на невелику відстань, доріжки, що використовуються, будуть змінюватися, за рахунок кількості об'єктів, які з'являються збоку або навіть прямо на шляху між передавачем і приймачем і можуть бути використані для забезпечення додаткової надійності для радіолінії шляхом покращення відносин сигнал/шум або збільшення пропускної спроможності каналу зв'язку.

Технології взаємодії пристрій-пристрій D2D (Device-to-Device) дозволяють покращити ефективність використання радіоспектру, підвищити пропускну здатність і знизити споживання електроенергії користувальницькими терміналами [2]. Технології D2D дозволяють як розвантажити ядро мережі шляхом замикавання значної частки трафіку безпосередньо між пристроями, так і зменшити час відгуку клієнта при наданні послуг мережі [2].

Технологія D2D у мережі Тактильного Інтернету передбачає можливість організації з'єднань наступних типів (рис. 4).

- термінал А – термінал R (або кілька терміналів) – БС (базова станція); пристрої взаємодіють із базовою станцією через ретрансляцію інформації за допомогою інших пристроїв;

- термінал А – БС – термінал В; пряма взаємодія без участі базової станції (взаємодія координується оператором);

- термінал А – термінал R (або кілька терміналів) – термінал В; пристрої передавача та одержувача відповідають за координацію взаємодії з використанням ретрансляторів; у цьому випадку пристрої передавача та споживача мають прямий зв'язок один з одним без будь-якого контролю з боку оператора;

- термінал А – термінал В; мають прямий зв'язок між собою без участі базової станції та без будь-якого контролю з боку оператора.

Основні переваги та проблеми даних технологій, які вимагають подальшого дослідження наведені в табл. 1.

Застосування D2D-технологій потенційно суттєво розширює можливості організації комп'ютерних мереж. Поряд з організацією прямих зв'язків з різними пристроями (моніторами, принтерами, телевізійними приймачами і т.д.), D2D взаємодії можуть бути використані для організації кластерів і транзиту трафіку через один з пристроїв, вибраний як головний (транзитний) вузол кластера. Застосування D2D-кластеризації підвищує ефективність використання радіочастотного ресурсу мережі.

Таблиця 1 – Результати аналізу

Назва	Переваги	Проблеми
MEC	Швидка аналітика даних, що покращує загальну ефективність додатків у режимі реального часу; Зменшення мережного трафіку; Наявність однієї точки відмови та адаптація розподілених обчислень; Можливість віртуалізації мережевих ресурсів; Покращення параметрів якості обслуговування (QoS) за рахунок мінімізації відстані, на яку відбувається передача даних; Підвищений рівень надійності, за рахунок встановлення додатків у безпосередній близькості від кінцевого пристрою.	Шлях між пристроєм кінцевого користувача та місцем розміщення даних часто довгий і недосконалий; Чим ближче обчислювальні ресурси знаходяться до користувача, тим складніше стає питання більш зручного місця розташування цих ресурсів; Не завжди можливо отримати достатню кількість каналів подвійної потужності;
SDN/NFV	Гнучкість – дозволяє швидко та легко розгорнути мережу та розпочати її експлуатацію; Ціна – зниження витрат на управління наданими послугами і управлінням всією мережею; Масштабованість – дозволяють протягом дня збільшувати або зменшувати обсяг використовуваних ресурсів того самого апаратного забезпечення залежно від навантаження; Безпека – за рахунок поділу та ізоляції сегментів мережі	Стандарти ще не до кінця розроблені, що спричиняє проблеми сумісності реалізацій; Проблеми міграції – традиційної мережної інфраструктури до архітектури NFV/SDN; Наявність власних дата-центрів у операторів, або доступність дата-центрів у хмарних провайдерів для аутсорсингу ресурсів стандартних серверів та систем зберігання даних.
MIMO	Поліпшення пропускної спроможності, без розширення полоси пропускання; Якість сигналу, що передається, і швидкість передачі даних; Антенні формують спрямований сигнал і завдяки цьому відбувається збільшення дальності дії мережі.	Швидкість та якість обробки сигналу залежить від підключеної техніки; Неможливість розташування пристроїв у невеликій близькості один від одного. Погано працює, якщо джерело або приймач сигналу переміщається.
D2D	D2D пристрої підтримують високу швидкість передачі даних та низькі наскрізні затримки завдяки прямому обміну на коротких відстанях та менш енерговитратно встановлювати зв'язок між собою, ніж встановлювати з'єднання через базову мережу; D2D дозволяє розвантажити трафік базової мережі, зменшити її навантаженість, звільнивши ресурс для пристроїв, що не використовують D2D з'єднання;	Інтеграція режиму D2D із дуплексною структурою UL/DL. Перспективи дизайну інтерфейсу D2D-пристроїв (як з апаратної сторони, так і з погляду протоколу) забезпечення необхідної гнучкості як функцій фізичного рівня, так управління доступом до середовища (Media Access Control, MAC).

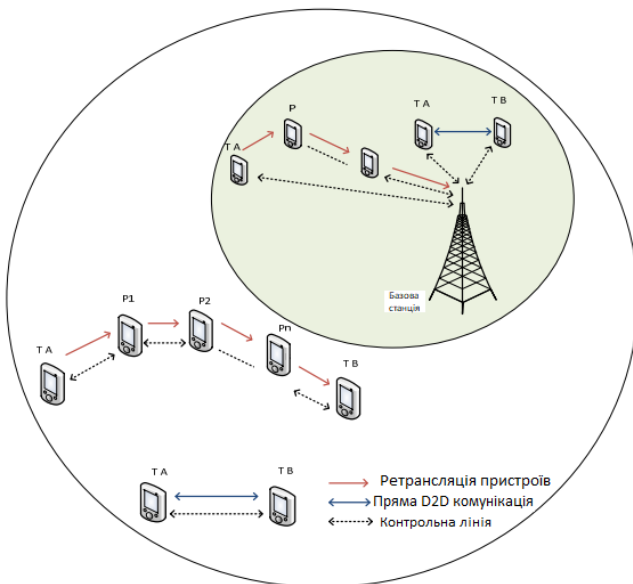


Рис. 4. Типи з'єднань технології D2D у мережі Тактильного Інтернету

Застосування кластеризації і транзитних пристроїв дозволяють в ряді випадків розширити зону зв'язку мережі або підвищити якість обслуговування (QoS) трафіку.

Потенційно, при досить високій щільності вузлів мережі, застосування D2D взаємодій дозволяє організувати маршрути доставки повідомлень, тобто ad hoc мережі.

Вимоги до мереж підтримки Тактильного Інтернету

З огляду на результати аналізу, що наведено у попередніх підрозділах, можна сформулювати наступні вимоги, що пред'являються до мереж підтримки Тактильного Інтернету:

- висока швидкість підключення – затримки менше 1 мс;
- висока надійність з'єднання – неприпустимі втрати сигналу в мережі, відмова обладнання у заданих умовах протягом заданого часу; конкретні вимоги до надійності відрізняються у різних видів послуг та додатків;
- безпека та конфіденційність є також ключовими вимогами для реалізації Тактильного Інтернету; враховуючи суворе обмеження часу очікування, засоби безпеки повинні підтримуватися фізично і мати низьке обчислювальне навантаження; зокрема, для цілей ідентифікації користувача можуть бути використані такі фізичні характеристики, як відбитки пальців, малюнок райдужної оболонки ока, модель поведінки користувача, які неможливо чи складно клонувати;
- стандартизація – засоби Тактильного Інтернету повинні обробляти тактильну інформацію так само, як і звичайну аудіо/відео інформацію; стандарти кодеків повинні бути схожими з сучасними аудіо та відео кодеками, для полегшення передачі «тактильних» даних через мережу з пакетною комунікацією.

Визначення факторів, що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету

У комп'ютерних мережах повинні бути розглянуті три основні затримки: час відгуку клієнта, затримка на рівні користувача та затримка під час керування. Час відгуку клієнта – це час від початку передачі пакета даних на прикладному рівні передавача до прийому даних на прикладному рівні приймача. До неї входять усі затримки, а саме: затримка у черзі, затримка обробки, затримка обчислень, затримка передачі, затримка розповсюдження, затримка повторних передач та затримка прийому. Час відгуку клієнта а в основному залежить від відстані та числа вузлів мережі, що беруть участь у процесі взаємодії.

Якість каналу між двома сусідніми вузлами залежить від ряду факторів, що впливають на поширення радіосигналу і його обробку в радіоприймальному пристрої.

В першу чергу, це фактори, що впливають на відношення сигнал/шум (шум + перешкода), такі як відстань, що визначає загасання сигналу в середовищі поширення і перешкоди, які мають місце в точці прийому.

В умовах мережі високої щільності слід очікувати, що найбільша частка перешкод буде створюватися сусідніми вузлами мережі (внутрішньоканальні перешкоди).

Завдання виконання вимог за величиною затримки 1мс накладає великі обмеження на системно-мережні рішення щодо побудови комп'ютерних мереж. За рахунок впровадження нових технологій телекомунікацій, таких як програмно-конфігуровані мережі (SDN), віртуалізація мережних функцій (NFV) та мобільні граничні обчислення (MEC) можна буде зменшити час відгуку клієнта, оскільки кінцевому користувачеві надається можливість обмінюватися даними з хмарою, розташованою на межі мережі (на мережі радіодоступу (RAN)) [5]. Затримка поширення – це час між передачею сигналу від ведучого пристрою базового домену до прийому його веденим пристроєм виконавчого домену. Тривалість цього часу в основному залежить від середньої відстані [4]. Оскільки крім затримки поширення є й інші затримки, затримка 1мс може бути досягнута тільки для взаємодій відносно на короткі відстані.

Для вирішення поставлених завдань необхідні поєднання ущільнення мережі, розвантаження та більша ефективність спектру.

Результативні можливості для великої кількості спектрів включають більш високу частоту смуги пропускання та агрегацію фрагментованих ресурсів спектра із використанням методів агрегації носіїв. Агреговане використання спектра може бути застосоване для подвійного зв'язку терміналів з декількома базовими станціями. Підвищення спектральної ефективності може бути реалізовано за рахунок таких надійних методів фізичного рівня, як 256-квадратурна амплітудна модуляція (QAM), схе-

ми модуляції більш високого порядку і схеми кодування (MCS). Також вони можуть бути об'єднані з

MIMO для збільшення пропускної здатності системи (рис. 5).

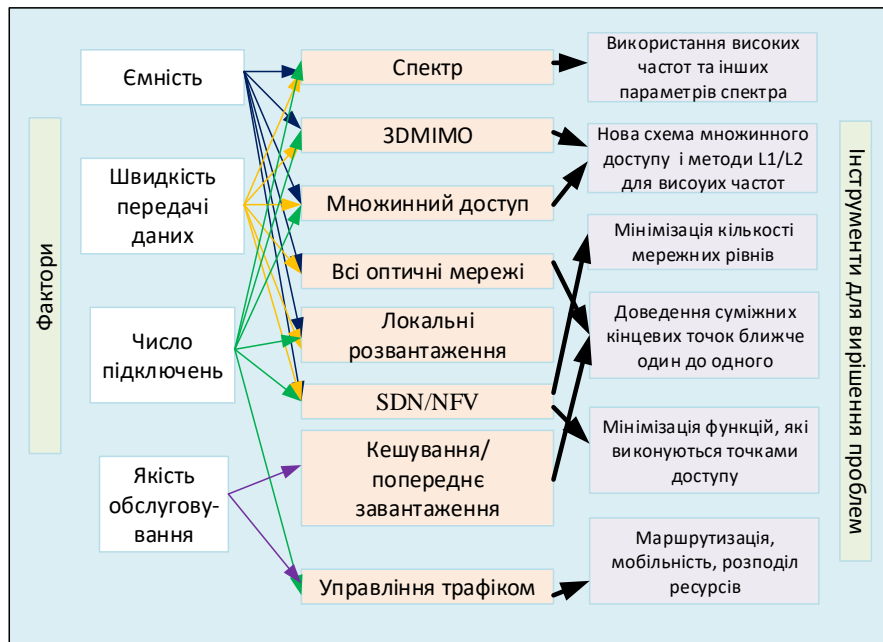


Рис. 5. Фактори що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету

Висновки

В даній статті розглянуто основні рівні системи Тактильного Інтернету засновані на структурі мережі 5G. Проведено аналіз технологій для реалізації

концепції ТІ, виявлено основні переваги, а також проблеми даних технологій, що вимагають подальшого їх дослідження. Розглянуто вимоги до мереж підтримки ТІ та визначено фактори, що впливають на зниження ефективності Тактильного Інтернету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярошевич, Р.О. Аналіз підходів до мінімізації затримок тактильного інтернету у комп'ютерних мережах / Р.О. Ярошевич, А.А. Коваленко // Проблеми інформатизації. Тези доповідей дев'ятої міжнародної НТК. – Черкаси: ЧДТУ; Харків: НТУ «ХПІ»; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТІГН; Харків: ДП «ПД ПКНДІ АП», 2021. – 18-19 листопада 2021. – С. 101.
2. Tehrani M. N., et al. Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 5. pp. 86–92.
3. Ateya A. A., Vybornova A., Kirichek R., Koucheryavy A. Multilevel Cloud Based Tactile Internet System // Proc. of 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2017. pp. 105–110.
4. Volkov, A., Ateya, A. A., Muthanna, A., Kirichek, R. MEC and SDN/NFV as a Solution for Providing 1ms in 5G/IMT-2020 Communication Networks // 73rd All-Russian Scientific-Technical Conference, Dedicated to the Day of Radio. 2018. Pp. 192–193.
5. Sharma, S.K., Woungang, I., Anpalagan, A., Chatzinotas, S. (2020). Toward Tactile Internet in beyond 5G era: recent advances current issues, and future directions. Ieee Access, 8, 56948-56991.

Received (Надійшла) 04.01.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.03.2022

Analysis of technologies to increase the efficiency of Tactile Internet in computer networks

R. Yaroshevych, A. Kovalenko

Abstract. The purpose of this work is to analyze the technologies that can improve the efficiency of Tactile Internet (TI) in computer networks. The concept of TI has developed due to the emergence and development of technologies that require very little delay in data delivery. This is primarily a service with certain requirements for interactivity. In particular, it can be a variety of control systems associated with the transfer of tactile sensations from the actuators and sensors to the controls. To increase the efficiency of TI, a number of promising technologies are being considered today, such as Device-to-Device (D2D) technology, without the use of a base station, which allows you to effectively build ultra-dense computer networks. Technologies such as MEC (Mobile Edge Computing), software-configured SDN (Software Defined Networks) and NFV (Network Functions Virtualization) network virtualization are of great importance for building networks with low delays. Low latency computer networks, which are based on the concept of Tactile Internet, are of great importance when choosing a method of building computer networks. This article considers various technologies and analyzes the main advantages and problems of these technologies, which require further study.

Keywords: Tactile Internet, computer network, Network Functions Virtualization Software Defined Networks.