

УДК 621.39

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.027882

Баланюк Ю.В., д.т.н.; Власенко В.О., к.т.н.;
Клепач І.В.; Волошин В.О.;
Галика К.В.

МОДЕЛЬНА ІНФРАСТРУКТУРА У ЦАРИНІ СЕРВІСІВ ТЕЛЕПРИСУТНОСТІ

Balanyuk Yu.V., Vlasenko V.O., Klepach I.V., Voloshyn V.O., Halyka K.V., Model infrastructure in the field of telepresence services. An extended description is proposed for a next-generation model network infrastructure intended for research, academic coursework, and testing of telepresence services under reproducible conditions. The architecture combines a terabit core, a cluster of server platforms, holographic fans, 3D cameras and projectors, avatar robots and multipurpose robots, augmented-reality terminals, and an IoT ecosystem for modeling ultra-dense deployments. We describe principles of installation, network segmentation, and service orchestration, as well as load-generation and telemetry-collection tools. Initial results are presented that outline guidelines for QoS/QoE requirements (latency, jitter, throughput, synchronization, rendering fidelity). The testbed's educational value and its modularity for integration with 5G/6G, edge/fog computing, and digital twins are emphasized. Directions for future work and criteria for comparative service testing are discussed.

Keywords: model network, telepresence, QoS, QoE, augmented reality

Баланюк Ю.В., Власенко В.О., Клепач І.В., Волошин В.О., Галика К.В. Модельна інфраструктура у царині сервісів телеприсутності. Запропоновано опис модельної інфраструктури мережі наступного покоління, призначеної для досліджень, навчальних курсів і випробувань сервісів телеприсутності. Архітектура ґрунтується на терабітному ядрі, кластері серверних платформ і комплексі кінцевих пристроїв: голографічних вентиляторів, 3D-камерах і проєкторах, роботах-аватарах і багатоцільових роботах, терміналах доповненої реальності, а також IoT-екосистемі для моделювання сценаріїв надщільних розгортань. Окреслено принципи розгортання та базові методики експлуатації стенда. Наведено первинні експериментальні результати, що можуть слугувати базою для визначення вимог до показників якості обслуговування (QoS) та якості сприйняття (QoE) у процесі надання послуг телеприсутності.

Ключові слова: модельна мережа, телеприсутність, QoS, QoE, доповнена реальність

Вступ

Епоха мереж п'ятого та наступних поколінь позначена не лише зростанням гетерогенності, а й істотним зміщенням ключових числових характеристик. Акумуляція таких пристроїв закономірно трансформується у нові якісні властивості інфраструктури. У фокусі опиняються надщільні сценарії розгортання та транспортні підсистеми з ультранизькими затримками. Поштовх до першого напрямку дала парадигма Інтернету речей, до другого – концепція тактильного Інтернету.

Історично кожний виток розвитку мереж супроводжувався створенням навчально-експериментальних полігонів: від цифрових АТС і пакетних сегментів NGN до сучасних IoT-стендів. Нині на часі платформа, спеціально спроектована для дослідження надщільних топологій і строгих вимог до затримки; пандемія додатково висвітлила експлуатаційні обмеження та змусила переглянути принципи проєктування і масштабування таких систем.

Йдеться про сервіси телеприсутності, масове впровадження яких раніше прогнозували ближче до 2030 року. Нові умови різко підвищили їхню актуальність, що вимагає поєднання теоретичного аналізу з репліковними експериментами, а також системної підготовки фахівців різних освітніх рівнів. Сукупність цих чинників зумовила розроблення модельної мережі нового покоління для підтримки сервісів телеприсутності.

Додатково пропонується методологія оцінювання, що включає вимірювання затримки, джитера, пропускної здатності, синхронізації та вірності рендерингу, а також інструменти генерації навантаження і збору телеметрії. Такий підхід забезпечує відтворюваність експериментів, дозволяє порівнювати альтернативні архітектурні рішення й служить основою для формування вимог до QoS/QoE у прикладних сценаріях.

Аналіз останніх досліджень. В [1] міститься огляд системних вимог і «вузьких місць» для голографічного зв'язку (захоплення, обробка, передавання, масштабованість). Стаття пропонує рамку для побудови НТС-систем із ультранизькими затримками. В [2] робота пропонує модель QoE для живої голографічної телепортації та емпірично оцінює вплив затримки/джитера. В [3] показано, як поєднання волоконно-бездротових (FiWi) доступових мереж і edge-інтелекту знижує затримки для телероботики/тактильного інтернету.

Постановка завдання. Створити відтворюваний полігон для дослідження сервісів телеприсутності в умовах мереж 5G/6G: надщільні розгортання, ультранизькі затримки, багатопотокове мультимедіа. Полігон має включати оптичне ядро до 4 Тбіт/с, сегмент надщільних бездротових мереж, конвеєр захоплення/передавання голографічних та AR-даних і контур керування роботами, з методиками навантаження, телеметрії та аналізу.

Метою роботи є експериментально підтвердити працездатність децентралізованої інфраструктури телеприсутності з гарантованими затримками; кількісно оцінити пропускну здатність, втрати, джитер і синхронізацію залежно від загасання та щільності вузлів; визначити пороги QoS/QoE і практичний «радіус цифрового кластера» (~50 км) та сформулювати рекомендації щодо розміщення обчислень на краю мережі.

Виклад основного матеріалу дослідження

Архітектура мережі. На рис. 1 подано схему полігону, що об'єднує три ключові сегменти: надщільні бездротові мережі, підсистему передавання зображень доповненої реальності та голографічних сцен, а також комплекс роботів-аватарів і багатоцільових роботів.

Для мережевого рівня розгорнуто високопродуктивне ядро на базі DWDM-обладнання [4] та сегмент програмно-конфігурованої мережі SDN [5]. Така комбінація забезпечує масштабованість, гнучке керування трафіком і можливість швидкого впровадження нових сервісів.

У межах полігону діють підсистеми керування конфігурацією й проведення експериментів, а також контур застосунків і оброблення даних: формується тривимірне відео для голографічних і AR-рішень [6], застосовуються методи машинного навчання в програмному забезпеченні роботів-аватарів. Оскільки здатність надавати сервіси телеприсутності критично визначається пропускну здатністю транспорту, подальший акцент зроблено на ядрі: для забезпечення потрібної якості передавання голографічного контенту часто потрібні терабітні швидкості.

Ядро мережі. Ядро побудовано на мультисервісній DWDM-платформі у зв'язці з комутаторами. Така конфігурація поєднує оптичний транспорт щільного спектрального ущільнення з комутаційним рівнем, що відповідає за агрегацію трафіка, сегментацію VLAN і базові політики QoS. Комутатори забезпечують зручну терміналізацію клієнтських інтерфейсів і подачу потоків на оптичні лінійні модулі, тоді як DWDM-шасі виконує транспортування на магістральних ділянках із мінімальними затримками.

Оптичний рівень орієнтований на роботу у високошвидкісних мережах DWDM і підтримує до 40 незалежних довжин хвиль (каналів), кожна з яких може надавати до 100 Гбіт/с. У підсумку досягається сукупна пропускну здатність до 4 Тбіт/с, чого достатньо для сценаріїв із голографічним контентом, потоковим 3D-відео та масовими підключеннями IoT-пристроїв [7] у надщільних зонах. За потреби схему можна масштабувати: додавати канали, підвищувати швидкість на довжині хвилі, розширювати кількість інтерфейсних плат або вводити резервні оптичні траси.

Експлуатаційно ядро підтримує централізоване керування, моніторинг стану оптичних секцій, базові механізми захисту від відмов (кільцювання/резервування), а також синхронізацію службового трафіка для вимірювань і телеметрії. Це спрощує постановку експериментів, дає змогу точно дозувати навантаження та відслідковувати вплив конфігураційних змін на затримку, джитер і пропускну здатність у типових для телеприсутності умовах.

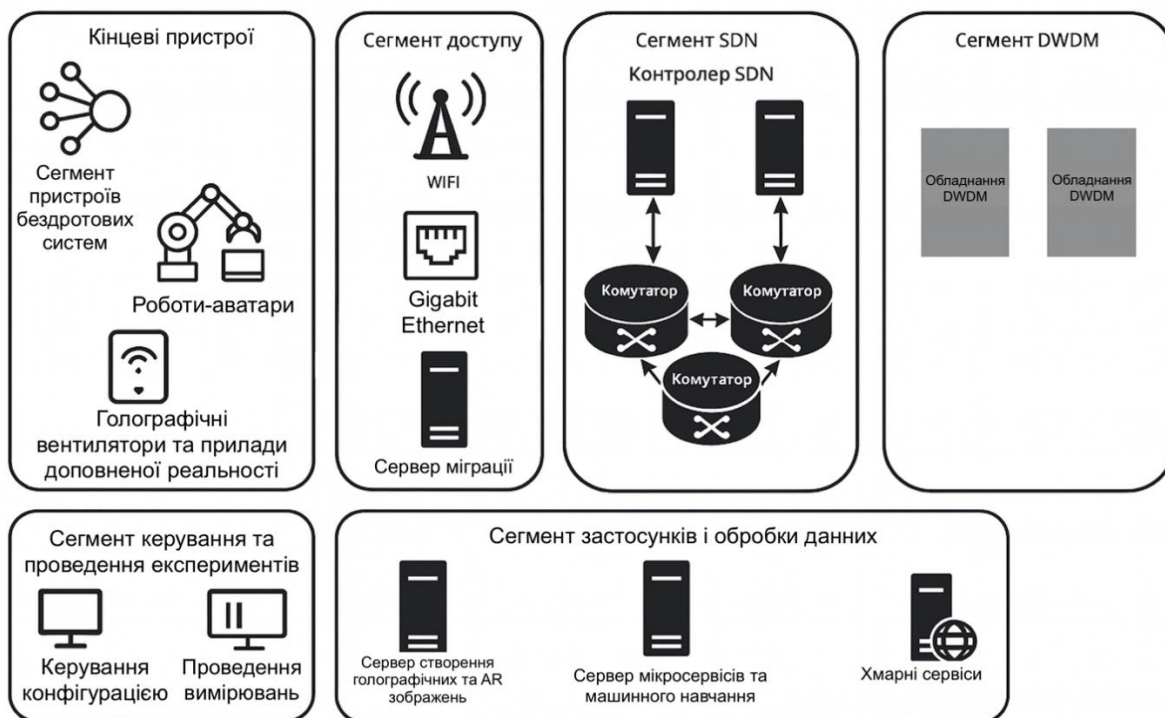


Рис. 1. Структура мережі

Структура DWDM-платформи.

1. Керовані оптичні мультиплексори OM-40 та демультиплексори OD-40. Їхнє завдання – об'єднувати окремі DWDM-канали в один спектрально ущільнений лінійний сигнал (на етапі мультиплексування) і, відповідно, розкласти його назад на окремі складові (на етапі демультиплексування). Потужність кожного каналу мультиплексора коригується вбудованим змінним оптичним атенуатором з дискретністю 0,1 дБ.

2. Тракт формування та розділення агрегованого сигналу. DWDM-канальний потік надходить на вхідний порт, проходить крізь керований оптичний атенуатор і далі – до хвилеводу, де канальні компоненти зводяться в єдиний ущільнений лінійний сигнал. У демультиплексорі селективні фільтри виконують зворотну операцію, виділяючи окремі DWDM-канали. Один комплект забезпечує роботу до 40 каналів.

3. Транспондер TD-10. Виконує 3R-регенерацію клієнтського оптичного потоку на 10 Гбіт/с і подає його на вхід DWDM-каналу мультиплексора, тобто узгоджує клієнтський інтерфейс з DWDM-транспортном. Потік із демультиплексора перетворюється назад у клієнтський інтерфейс. Клієнтські порти реалізовано через XFP-модулі (10GE, STM-64, OTU2), лінійний інтерфейс – OTU2; бітова швидкість – 10,7 Гбіт/с. TD-10 може переносити один або два клієнтські потоки; виправлення помилок не застосовується.

4. Агрегувальний транспондер MD-D3FS. Також виконує 3R-регенерацію і або транспортує один потік STM-64, або агрегує два потоки GE/STM-1/STM-4 у лінійний OTN-сигнал OTU1. І клієнтські, і лінійні інтерфейси – через SFP-модулі. На відміну від TD-10, підтримує FEC за G.709 або Super-FEC за G.975.

5. Підтримувані інтерфейси та швидкості. У наведеній конфігурації платформа працює з інтерфейсами STM-1, STM-4, GE, STM-16, 10GE, STM-64 та OTU2, покриваючи діапазон від 155 Мбіт/с (155 520 кбіт/с) до 10,7 Гбіт/с.

6. Підключення клієнтського обладнання. З боку клієнтів DWDM-система з'єднана з комутаторами D-Link DES-3526 у топології «зірка». Для стикування застосовуються модулі SFP (Mini-GBIC), що підтримують швидкості від 155 Мбіт/с (155 520 кбіт/с) до 10 Гбіт/с (10,7 Гбіт/с). На термінальній стороні доступні Ethernet, Fast Ethernet і Gigabit Ethernet зі швидкостями від 10 Мбіт/с до 2 Гбіт/с; пропускну здатність кожного порту можна програмно змінювати з кроком 1 Мбіт/с.

7. Експериментальні умови та вплив затухнення. Під час тестувань між крайовими вузлами встановлювався змінний оптичний атенюатор з кроком налаштування 0,05 дБ. Із ростом загасання збільшується імовірність помилок: для протоколів із повторною передачею це призводить до додаткових затримок, а для протоколів зі «стираними» пакетами – до підвищених втрат. Така методика дозволяє контролювано відтворювати складні умови роботи та оцінювати стійкість системи.

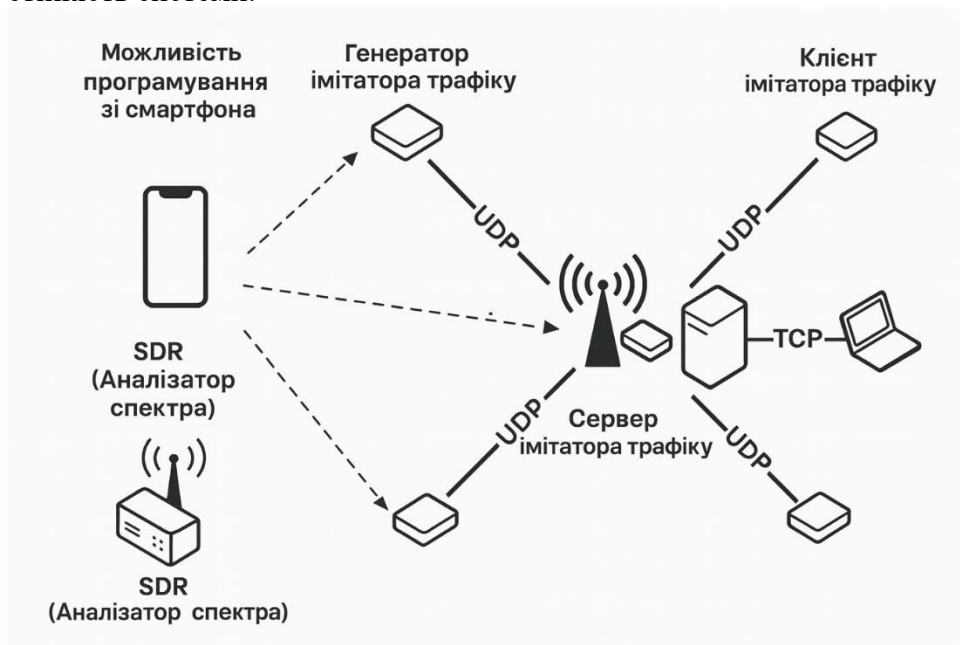


Рис. 2. Будова сегменту модельної мережі

Сегмент надщільних мереж. На рис. 2 подано фрагмент модельної мережі, що імітує бездротову систему з великою щільністю вузлів. Її основу становить набір програмованих контролерів із радіомодулями, які дають змогу оперативно змінювати конфігурації та відтворювати різні ролі й поведінкові сценарії вузлів. Скупчене розміщення пристроїв у обмеженій зоні свідомо створює взаємні завади й колізії доступу, характерні для надщільних розгортань.

Для спостереження та вимірювань стенд обладнано програмно-визначуваним радіо (SDR) і кількома точками доступу. Спеціальні утиліти забезпечують генерацію користувацького трафіку, контроль профілів навантаження та гнучке керування розподілом радіоресурсів.

На рис. 3 показано, як змінюється швидкість обміну між точкою доступу й клієнтом зі зростанням кількості активних сусідніх пристроїв у робочому каналі (від 0 до 4). На рис. 4 наведено аналогічну залежність за умови навантаження суміжного каналу.

Приклади підтверджують, що запропонований сегмент дозволяє швидко й недорого досліджувати властивості надщільних мереж, тому він зручний для навчальних курсів. Усі компоненти легко перепрограмовуються, а роль терміналів і інструментів розробки можуть виконувати звичайні смартфони, що істотно збільшує парк доступних пристроїв для експериментів.

Крім того, на полігоні можна оцінювати вплив мережевої топології, заданої різними фрактальними конструкціями, на планування реальних надщільних систем. Як приклади розглядаються «серветка» Серпінського, а також криві Гільберта та Пеано.

Сегмент голографічних зображень і доповненої реальності. У найближчому майбутньому серед базових послуг телеприсутності очікується мережеве передавання голографічного образу людини та AR-контенту. Існує кілька методів формування таких зображень, але всі вони спираються на багаторакурсне відеознімання. Використовують як звичайні RGB-камери, так і сенсори глибини, що вимірюють відстань до об'єкта – здебільшого на інфрачервоній основі. Дані глибини дають змогу скорочувати кількість камер, однак

вимагають алгоритмів реконструкції 3D-сцени з поєднанням кольору та відстані. У лабораторії застосовують Microsoft Kinect і Intel RealSense.

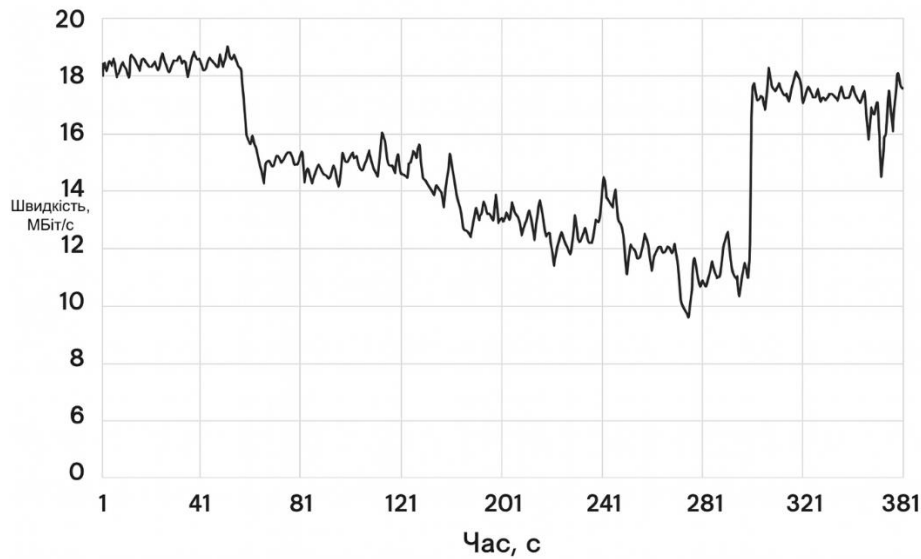


Рис. 3. Результат аналізу залежності швидкості передачі від завантаження каналу в умовах впливу сусідніх пристроїв

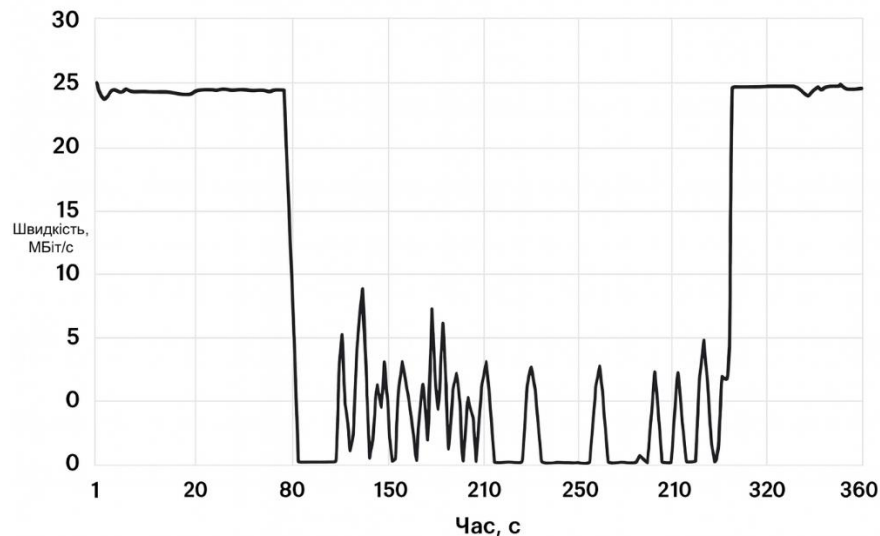


Рис. 4. Результат аналізу залежності швидкості передачі від завантаження сусіднього каналу

Після збирання відео постає завдання підготовки даних до передавання. Один підхід – транспортувати повний набір потоків з усіх камер, що різко підвищує вимоги до смуги пропускання через високу роздільність, глибину кольору та частоту кадрів; навіть одиничне джерело може потребувати десятки Гбіт/с, а повноцінне 3D – десятки чи сотні камер. Альтернатива – реконструювати 3D-модель на передавальному боці та надсилати компактний опис об'ємних елементів, істотно зменшуючи трафік ціною додаткових обчислень.

Способи відтворення також відрізняються. Для одного ракурсу доречні стереометоди (анaglіф або активні окуляри 3D): достатньо двох потоків для лівого й правого ока; виведення можливе на монітор, проектор чи голографічний вентилятор (у нас – Dsee Lab-65H і N20). Якщо потрібно синхронно показувати об'єкт з різних позицій кільком користувачам, застосовують окуляри доповненої реальності (у нас – Epson) або смартфони з AR; у складніших варіантах – оптичні системи з інтерференційними ефектами.

Експерименти (рис. 5) свідчать: помітне падіння швидкості передавання голографічних потоків настає вже за затушення близько 24 дБ. Це відповідає ситуації, коли на дистанціях порядку 100 км (≈ 1 мс односторонньої затримки на фізичному рівні) надання сервісів телеприсутності суттєво ускладнюється. За круговою затримкою це формує «радіус цифрового театру» близько 50 км.

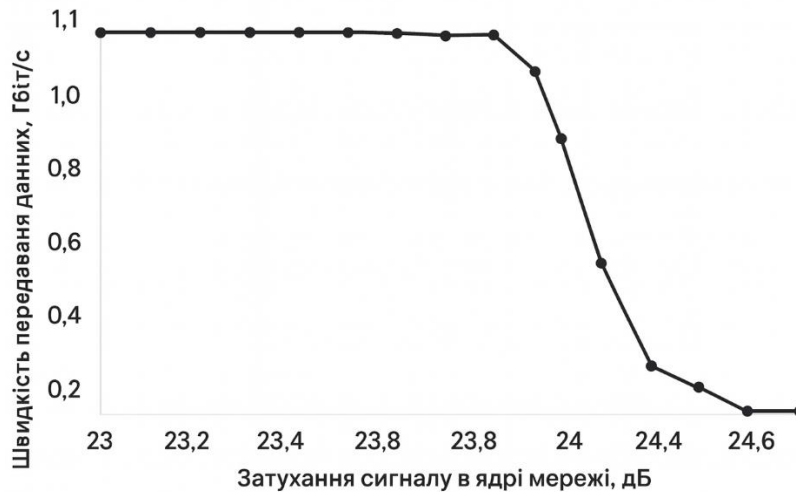


Рис. 5. Вплив затушення на швидкість передачі голографічних зображень

Сегмент роботів-аватарів і багатоцільових роботів. У цьому сегменті продемонстровано дистанційне керування багатоцільовим маніпулятором Dobot Magician. Завдяки змінним насадкам він виконує 3D-друк (модуль 3D Printer), письмо та графічні операції (тримач для ручки), лазерне гравіювання (лазерний модуль), маніпулювання предметами (вакуумний і механічний захвати з пневмоприводом).

Під час випробувань із пакетним керуванням для задач перенесення об'єктів побудовано залежність коефіцієнта доставлення команд від рівня загасання каналу (рис. 6). Спостерігається той самий поріг, еквівалентний односторонній затримці на близько 100 км: погіршення якості радіоканалу призводить до «зависання» маніпулятора в проміжній позиції та зриву операції, що відображає чутливість роботизованих застосунків телеприсутності до затримок і втрат.

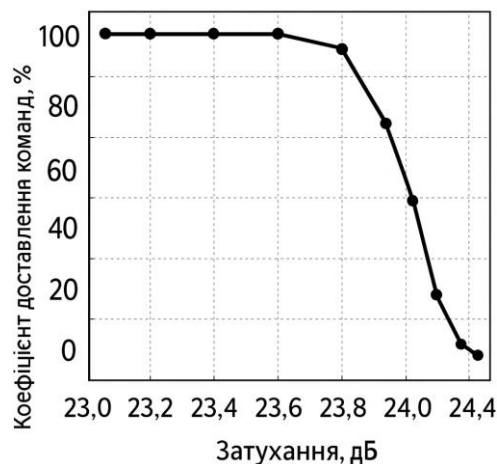


Рис. 6. Вплив затушення на коефіцієнт затушення пакетів

Висновки

Мережі п'ятого й наступних поколінь вимагають випробувальних полігонів, здатних відтворювати їхні ключові особливості – надшвидкі розгортання та ультранизькі затримки, що особливо актуально для сервісів телеприсутності, чия важливість різко зросла під час пандемії.

Запропонований стенд побудовано навколо оптичного ядра на DWDM, яке забезпечує сукупну пропускну здатність до 4 Тбіт/с і створює запас для передачі важких мультимедійних потоків. Інфраструктура організована як три взаємопов'язані модулі: сегмент надщільних бездротових мереж, підсистема транспорту голографічного та AR-контенту, а також контур роботів-аватарів і багатоцільових маніпуляторів. Перші вимірювання підтверджують доцільність рознесення обчислень і сервісів ближче до користувача та окреслюють практичну межу «радіуса цифрового кластера» – близько 50 км за круговою затримкою, за якої вдається зберігати потрібні показники якості обслуговування і сприйняття. У підсумку створена модельна інфраструктура демонструє технічну здійсненність телеприсутності за умови децентралізованої архітектури й ретельного контролю затримок у транспорті.

Список використаної літератури:

1. Challenges in Implementing Low-Latency Holographic-Type Communication Systems / R. Petkova et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9617. URL: <https://doi.org/10.3390/s22249617>.
2. C. Udora, P. Qian, S. Anmulwar, A. Fernando and N. Wang, "Quality of Experience Modelling and Analysis for Live Holographic Teleportation," 2024 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Big Island, HI, USA, 2024, pp. 598-604, DOI: 10.1109/ICNC59896.2024.10556032.
3. Maier M., Ebrahimzadeh A. Towards Immersive Tactile Internet Experiences: Low-Latency FiWi Enhanced Mobile Networks With Edge Intelligence [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2019. Vol. 11, no. 4. P. B10. URL: <https://doi.org/10.1364/jocn.11.000b10>.
4. Lee H.-K., Choo J., Kim J. 16 Ch × 200 GHz DWDM-Passive Optical Fiber Sensor Network Based on a Power Measurement Method for Water-Level Monitoring of the Spent Fuel Pool in a Nuclear Power Plant. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 12. P. 4055. URL: <https://doi.org/10.3390/s21124055>.
5. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey / D. Kreutz et al. *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103, no. 1. P. 14–76. URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2371999>.
6. An Overview of Augmented Reality / F. Arena et al. *Computers*. 2022. Vol. 11, no. 2. P. 28. URL: <https://doi.org/10.3390/computers11020028>.
7. A Comprehensive Survey on the Internet of Things with the Industrial Marketplace / K. O. M. Salih et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 730. URL: <https://doi.org/10.3390/s22030730>.

Автори статті

Баланюк Юрій – доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0003-3036-5804

Власенко Вадим – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-9329-5914

Клепач Ігор – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0004-4394-3233

Волошин Василь – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0008-6906-6370

Галика Каріна – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0003-5891-4438

Authors of the article

Balanyuk Yuriy – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0003-3036-5804

Vlasenko Vadym – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-9329-5914

Klepach Ihor – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0004-4394-3233

Voloshyn Vasyi – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0008-6906-6370

Halyka Karina – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0003-5891-4438