

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Удянському Роману Олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Метод обслуговування голографічного трафіка в мережі
спільного користування _____

затверджена наказом по університету від “ 21 ” квітня 2025 р. № 296 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 16 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ камера RGB-D, програма OBS Studio, openflow,
віртуальний сервер з технологією SDN, віртуальні комутатори. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) аналіз голографічного типу комунікації; _____

2) характерні особливості поведінки голографічного трафіка; _____

3) обслуговування голографічного трафіку в мережах спільного користування; _____

4) висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

Слайд-презентація – 18 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел та аналіз предметної області досліджень	22.04.25-29.04.25	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	30.04.25-05.05.25	
3	Вибір інструментальних засобів	06.05.25-09.05.25	
4	Розробка моделей протоколів	10.05.25-21.05.25	
5	Проведення експериментів	22.05.25-02.06.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.06.25-05.06.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	06.06.25-09.06.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	10.06.25-12.06.25	

Дата видачі завдання “ 21 ” квітня 2025 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

доц. Тетяна ФІЛІМОНЧУК _____

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 90 с., 42 рис., 16 табл., 1 дод., 17 джерел.

ГОЛОГРАФІЧНА КОМУНІКАЦІЯ, АГРЕГОВАНИЙ ТРАФІК,
МЕРЕЖА СПІЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ, ЩІЛЬНІСТЬ РОЗПОДІЛУ.

Об'єктом дослідження є процес голографічної комунікації.

Предметом дослідження є характеристики трафіку та якість обслуговування голографічного типу комунікацій.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у підвищенні якості передачі голографічної інформації за рахунок удосконалення методу обслуговування трафіку голографічного типу комунікацій у мережах п'ятого та наступних поколінь при спільному використанні каналів зв'язку.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз голографічних послуг та голографічного типу комунікацій, а також напрямів розвитку мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь для надання даних послуг.

Проведені дослідження характерних особливостей поведінки голографічного трафіка та процесів обслуговування різних варіантів формування трафіку 3D.

Розроблені та досліджені модель та метод процесу обслуговування голографічного трафіку в мережах спільного користування.

ABSTRACT

Master's thesis: 90 pages, 42 figures, 16 tables, 1 appendices, 17 sources.

HOLOGRAPHIC COMMUNICATION, AGGREGATED TRAFFIC,
SHARED NETWORK, DISTRIBUTION DENSITY.

The object of the study is the process of holographic communication.

The subject of the study is the characteristics of traffic and the quality of service of the holographic type of communications.

The purpose of the qualification work is to improve the quality of holographic information transmission by improving the method of servicing the traffic of the holographic type of communications in networks of the fifth and subsequent generations when sharing communication channels.

During the qualification work, an analysis of holographic services and holographic type of communications was carried out, as well as directions for the development of communication networks of the fifth and subsequent generations for providing these services.

Studies of the characteristic features of the behavior of holographic traffic and the processes of servicing various options for forming 3D traffic were conducted.

A model and method of the process of servicing holographic traffic in shared networks were developed and investigated.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТИПУ КОМУНІКАЦІЇ	11
1.1 Термінологічна система дослідження.....	11
1.2 Голографічний тип комунікації: аналіз основних особливостей.....	15
1.3 Основні етапи розвитку голографічних технологій	17
2 ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТРАФІКА	25
2.1 Використання технології щільного мультиплексування з поділом довжин хвиль DWDM.....	25
2.2 Дослідження трафіку застосунків віртуальних аватарів.....	33
2.3 Дослідження процесів обслуговування трафіку 3D відеопотоку з використанням оптоволоконного кабелю	40
2.4 Дослідження передачі трафіку 3D відеопотоку з використанням бездротового середовища (Wi-Fi)	43
2.5 Дослідження передачі трафіку 3D відеопотоку з використанням технології Ethernet.....	45
3 ОБСЛУГОВУВАННЯ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ СПІЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ	48
3.1 Дослідження характеристик мережевого трафіку.....	48
3.2 Дослідження параметрів та проведення порівняльного аналізу трафіку мультимедіа та голографічного трафіку	52
3.3 Основні етапи методу обслуговування голографічного трафіка	59
3.4 Дослідження агрегованого потоку з голографічним трафіком	61
3.5 Процес передачі змішаного трафіку	72
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	79
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	81

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- ГТК – голографічний тип комунікації
- ШІ – штучний інтелект
- ІР – Інтернет речей
- ІКТ – інфокомунікаційні технології
- ІТ – імерсивні технології
- ПКМ– програмно-конфігуруємі мережі
- ПЗ – програмне забезпечення
- ЦОД – центр обробки даних
- 5G – п'яте покоління мобільного зв'язку (англ., Fifth Generation Of Mobile Communications)
- 3D – тривимірний (англ., Three Dimensional)
- AI – штучний інтелект (англ.. Artificial Intelligence)
- AR – доповнена реальність (англ., Augmented Reality)
- CGH – комп'ютерно-генеровані голограми (англ., Computer-Generated Holograms)
- DWDM – технологія оптичної передачі даних (англ., Dense-Wavelength Division Multiplexing)
- HT – голографічна телепортація (англ., Holographic Teleportation)
- HTC – голографічний тип комунікації (англ., Holographic Type Communication)
- IoT – Інтернет речей (англ., Internet of Things)
- ІТ – імерсивні технології (англ.. Immersive technologies)
- QoS – якість обслуговування (англ., Quality of Service)
- MR – змішана реальність (англ.. Mixed Reality)
- RTT – час затримки у зворотньому напрямку (англ.. Round trip Time)
- SDN – програмно-конфігуровані мережі (англ., Software-Defined Networking)
- VR – віртуальна реальність (англ.. Virtual Reality)
- XR – розширена реальність (англ.. Extended Reality)

ВСТУП

В даний час можна спостерігати стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій та інформаційних послуг, що повсюдно впроваджуються у всі сфери людської діяльності. За останні 20 років послуги зв'язку зазнали суттєвих змін, включаючи розширення номенклатури наданих відеопослуг, впровадження послуг доповненої реальності та як наслідок поява голографічного типу комунікації (ГТК, Holographic Type Communication).

Сьогодні великий інтерес у користувачів та дослідників у всьому світі викликає передача голографічної інформації для забезпечення ефекту присутності співрозмовника. Насправді це підтверджується появою величезного числа різноманітного та різнотипного обладнання, що дозволяє як формувати голографічний потік, і відтворювати його з іншого боку у реальному режимі часу. Очевидно, що цей вид комунікації пред'являє високі вимоги до пропускної спроможності мережі, які існуючих мереж зв'язку варіюються в діапазоні від 10 Мбіт/с до 4,2 Тбіт/с.

Телеприсутність є сеансом інтерактивного аудіовізуального зв'язку між віддаленими щодо друг друга локаціями, надаючи при цьому, завдяки оптимізації різних атрибутів, можливість відчувати ефект присутності та відчувати почуття повної дійсності. Новий вид телеприсутності – голографічний тип комунікацій, що відкриває перед користувачами нові можливості та відчуття.

Тенденції впровадження голографічних послуг та голографічного типу комунікації, які вже сьогодні вимагають перегляду принципів планування, проектування та побудови існуючих мереж зв'язку, а також підходів до реалізації мереж шостого покоління 6G, в основі яких лежить інтеграція різноманітних технологій та мереж зв'язку в єдину мережу. Окремим питанням стоїть оцінка якості обслуговування та якості сприйняття голографічних послуг як об'єктивними, і суб'єктивними методами оцінки.

Практично відсутні критерії оцінки якості голографічного зображення, зокрема шкали та методи суб'єктивної оцінки якості надання голографічних послуг. Більше того, властивості голографічного потоку досить мало вивчені, а тим більше його вплив на мережі зв'язку та вимоги до параметрів мереж, що робить завдання дослідження характеристик трафіку та оцінки якості обслуговування голографічних послуг дуже актуальними.

Отже, науково-технічне завдання підвищення якості передачі голографічної інформації є актуальним.

Об'єктом дослідження є процес голографічної комунікації.

Предметом дослідження є характеристики трафіку та якість обслуговування голографічного типу комунікацій.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у підвищенні якості передачі голографічної інформації за рахунок удосконалення методу обслуговування трафіку голографічного типу комунікацій у мережах п'ятого та наступних поколінь при спільному використанні каналів зв'язку.

Мета роботи досягається послідовним вирішенням наступних завдань:

- провести аналіз голографічних послуг та голографічного типу комунікацій, а також напрямів розвитку мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь для надання даних послуг;

- провести дослідження характерних особливостей поведінки голографічного трафіка;

- провести дослідження процесів обслуговування різних варіантів формування трафіку 3D;

- розробити та дослідити модель та метод процесу обслуговування голографічного трафіку в мережах спільного користування.

Для вирішення поставлених завдань використовувалися методи системного аналізу, теорії масового обслуговування, теорії математичної статистики та методів аналітичного імітаційного моделювання.

Наукова новизна дослідження полягає в такому: удосконалений метод обслуговування трафіку голографічного типу комунікацій у мережах п'ятого

та наступних поколінь при спільному використанні каналів зв'язку за рахунок визначення розподілів складових агрегованого трафіку, який має однією із складових голографічну інформацію, що сприяло підвищенню якості її передачі.

Практична цінність дослідження полягає у підвищенні якості передачі голографічної інформації.

За результатами проведених досліджень була надрукована наукова стаття в фаховому виданні за 123 спеціальністю «Системи управління, навігації та зв'язку» [1].

1 АНАЛІЗ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТИПУ КОМУНІКАЦІЇ

1.1 Термінологічна система дослідження

Ключовою характеристикою сучасного розвитку інформаційно-комунікаційних технологій є інтерактивність комунікації.

Аналізуючи дослідження, можна визначити, як провідну, тенденцію до спроби вирішити проблему відтворення голографічного образу співрозмовника в режимі реального часу при спілкуванні в мережах зв'язку. Абонент отримує можливість спостерігати за співрозмовником та спілкуватися з ним, використовуючи голографічний аватар. Голографічне зображення, на відміну стереоскопічного, з'являється об'єктивно і відтворює реальний об'єкт. Для комунікації з ефектом присутності реалізували технологію голографічного зв'язку, яка дає змогу передавати голографічні копії.

Розглядаючи термінологічну систему даного дослідження, виділимо наступну основну групу термінів: голографічний тип комунікації (ГТК), зв'язок голографічного типу, голографічна телеприсутність, голографічна телепортація (голопортація), голографічні копії, голографічний аватар, іммерсивні технології телекомунікаціях.

Голографічна комунікація позначається як технологія, яка в інтерактивному режимі доставлятиме цифрові 3D-зображення з одного або декількох джерел в один або кілька цільових вузлів [2] (рисунок 1.1).

ГТК може надсилати голограми та інші мультисенсорні мультимедіа через бездротові та дротові мережі у віддалені місця [9]. Система ГТК здебільшого складається з трьох частин, а саме: джерела, мереж та пункту призначення [3]. Голограми та мультимедіа створюються або зберігаються в джерелі, що відправляються через мережі ГТК, візуалізуються та подаються у пункті призначення [4].



Рисунок 1.1 – Цифрові 3D-зображення

Holoportation – це новий тип технології 3D-захоплення, яка дозволяє реконструювати, стискати та передавати високоякісні 3D-моделі людей у будь-яку точку світу в режимі реального часу. У поєднанні з дисплеями змішаної реальності, такими як HoloLens, ця технологія дозволяє користувачам бачити, чути та взаємодіяти з віддаленими учасниками у 3D, начебто вони насправді присутні у тому ж фізичному просторі.

У деяких дослідженнях [5] представлено новий засіб комунікації Holoportation із розширеними інтерактивними можливостями. Розроблено наскрізну систему для телеприсутності доповненої та віртуальної реальності, яка називається Holoportation, що демонструє високоякісні 3D-реконструкції в реальному часі всього простору, включаючи людей, меблі та об'єкти, з використанням набору нових глибинних камер. Дані 3D-моделі також можуть передаватися в реальному часі віддаленим користувачам, що

дозволяє абонентам, які використовують дисплеї віртуальної або доповненої реальності, бачити, чути та взаємодіяти з віддаленими учасниками в 3D, майже так, якби вони були присутні в тому ж фізичному просторі.

Розширена реальність (XR) – термін, який відноситься до всіх реальних та віртуальних середовищ, таких як VR-технології (віртуальна реальність), AR-технології (доповнена реальність) та MR-технології (змішана реальність), об'єднаними разом [6].

XR-технологія створює ефект повного занурення для користувача, допомагаючи йому відчувати максимальну присутність у штучно створених світах.

На сучасному етапі актуальнішим стає термін «голографічна телеприсутність». Голографічна телеприсутність – це технологія, що розвивається, для повномасштабних тривимірних (3D) відеоконференцій. Системи голографічної телеприсутності можуть проектувати реалістичні повноцінні 3D-зображення віддалених людей та об'єктів, у реальному часі безпосередньо у приміщення, а також здійснювати аудіозв'язок у реальному часі з рівнем реалізму, що змагається з фізичною присутністю. Зображення віддалених людей і навколишніх об'єктів захоплюються, стискаються, передаються ширококутковою мережею, розпаковуються і, нарешті, проектуються за допомогою лазерних променів майже так само, як створюється звичайна голограма. Голографічна телеприсутність має потенціал для революції у різних типах комунікацій [2].

Отже, у межах цього дослідження, термін «голографічне телеприсутність» трактується, як психічний стан користувача, у якому він відчуває взаємодію з віртуальними об'єктами і суб'єктами, як із реальними у процесі голографічної комунікації.

Голографічна телеприсутність розглядається нами як результат еволюційного розвитку різних типів комунікацій і є найефективнішим способом здійснення комунікації, проєціюючи віддалених учасників відеоконференції у вигляді голограм.

У сфері вивчення інноваційних інфокомунікаційних технологій часто використовується термін «голографічні копії» для цього дослідження було розроблено таке визначення терміну.

Голографічна копія – це записана та оброблена інформація про об'єкт, необхідна та достатня для візуалізації голографічного контенту та взаємодії з ним у процесі голографічного типу комунікації.

Для реалізації голографічного типу комунікації часто використовують голографічні аватари. Для даного дослідження було розроблено наступне визначення терміну Голографічний аватар – це гіперреалістична 3D модель людини, створена за реальним прототипом користувача, з використанням програмних платформ штучного інтелекту, що забезпечують машинне навчання нейронної мережі. На відміну від віртуальних цифрових аватарів, якими керують користувачі, голографічний аватар є повністю автономним, автоматизованим, який контактує з користувачем завдяки нейронній мережі [4].

Терміну імерсивні технології в телекомунікаціях також приділяється достатня увага в роботах вчених у сфері телекомунікацій. В рамках даного терміну маються на увазі технології, які приносять у дистанційне спілкування користувачів ефект присутності.

Під імерсивними технологіями в телекомунікаціях, розуміємо технології, що вносять у дистанційне спілкування людей застосункові види інформації, що дозволяють створювати ефект повної присутності людини у віддаленому від нього на велику відстань середовищі за рахунок створення тривимірних моделей людей та простору, а також впливу на всі органи почуттів людей.

Голографічна телеприсутність — це технологія, що розвивається, для повномасштабних тривимірних (3D) відеоконференцій. Системи голографічної телеприсутності можуть проектувати реалістичні, повноцінні, 3D-зображення віддалених людей та об'єктів у реальному часі до кімнати, а також аудіозв'язок у реальному часі з рівнем реалізму, що конкурує з

фізичною присутністю. Зображення віддалених людей і навколишніх об'єктів захоплюються, стискаються, передаються широкопasmовою мережею, розпаковуюються і, нарешті, проєктуються за допомогою лазерних лучів майже так само, як створюється звичайна голограма. Голографічна телеприсутність має потенціал для революції у різних типах комунікацій.

З урахуванням потреб ключових галузей економіки та соціальної сфери (освіта, охорона здоров'я, будівництво, транспорт, фінанси, оборона країни, безпека держави та ін.) в сучасних телекомунікаційних сервісах до 2035 року більшість державних компаній і організацій з державною участю зацікавлені в отриманні рухомого радіотелефонного зв'язку з використанням технології 5G та 6G; фіксованого широкопasmового доступу до мережі Інтернет зі швидкістю доступу 1 Гбіт/с і вище; супутникового радіозв'язку, у тому числі широкопasmового доступу до мережі Інтернет; бездротового зв'язку малого радіусу дії та професійного радіозв'язку. Органи державної влади зацікавлені у розширенні програм з усунення цифрової нерівності, а також у підключенні віддалених та важкодоступних територій із використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку [6].

Резюмуючи, зазначимо, що фактор розвитку інноваційних інфокомунікаційних технологій (ІКТ) з використанням мереж 5G та 6G, що забезпечують голографічну комунікацію, має важливий вплив на підвищення рівня технологічного суверенітету країни.

1.2 Голографічний тип комунікації: аналіз основних особливостей

Голографічна комунікація на даному етапі є найбільш інноваційною формою передачі, що використовує голографічну технологію до створення тривимірних зображень і проєцируюча в реальному просторі. У зв'язку з цим, аналізуючи голографічну комунікацію, як нову технологію, насамперед, сфокусуємо увагу на потенційних можливостях технології зробити спілкування більш природним, реалістичним та зручним. Створюючи

тривимірні об'ємні зображення, голографічна технологія дозволяє бачити співрозмовника з різних ракурсів, не вдаючись до різних видів окулярів. Голограма передає жести та міміку абонента, роблячи спілкування більш емоційним та зрозумілим, нівелюючи ризик помилкового сприйняття інформації, створюючи ілюзію реальної присутності співрозмовника.

Наступна важлива складова характеристики голографічного типу комунікацій, це забезпечення передачі і створення голограм як реального часу. Безпосереднє – тут і зараз – спілкування з голограмою співрозмовника, що викликає, саме зараз, відгук і емоційну реакцію, відрізняє голографічну комунікацію від інших типів комунікації. Така особливість – комунікація як реального часу, підводить до логічного висновку про значимої особливості ГТК – можливості здійснення комунікації лише за передачі значного обсягу даних.

Характерним для цього виду комунікації є і обов'язкова наявність кількох джерел збору (захоплення) даних. Записують інформацію про суб'єкта або об'єкта, використовуючи камери (датчики), які дають можливість створити 3D-реконструкцію, як основу для обробки голографічних даних з наступними процедурами адаптації/реконструкції, кодування, стиснення та ін.

Як ще одну особливість голографічного типу комунікації (ГТК) виділимо властиву їй імерсивність. На відміну від традиційних двовимірних (2D) зображень ГТК створює ефект присутності (імерсивність), роблячи комунікаційну взаємодію реалістичною та природною.

Наявність спеціальних вимог до властивостей та характеристик мереж зв'язку також виділяє цей вид комунікації.

Отже, при використанні технологій ГТК передбачається, що ці програми вимагають значно більшої пропускної спроможності, ніж це необхідно для інших видів послуг зв'язку. Враховуючи те, що реалізація цифрової телепортації, враховуючи особливості передачі голографічних копій, може пред'являти високі вимоги до пропускної спроможності.

Висока пропускна спроможність, ультра малі затримки, надійність з'єднання – необхідні умови для більш активного впровадження нових послуг зв'язку з використанням голографічних технологій та, отже, розширення спектра дослідницьких програм та проектів для вивчення голографічного типу комунікацій.

1.3 Основні етапи розвитку голографічних технологій

Актуальність дослідження розвитку голографічних технологій зумовлена переходом на новий етап впровадження сучасних інноваційних технологій, що передбачає в перспективі активне використання голографії.

Простежується загальна глобальна тенденція роботи фахівців із тривимірними зображеннями у різних галузях діяльності людини. Голографія, відображаючи об'єкт у трьох вимірах, є одним із найперспективніших напрямів візуалізації тривимірних об'єктів, що обґрунтовує появу певного наукового інтересу до цієї галузі досліджень.

Відображаючи реальну дійсність, голограма має унікальну властивість: голографічне зображення відтворює точну тривимірну копію оригінального об'єкта, на відміну від фотографії, яка створює плоске зображення. Голографічне зображення з великою кількістю ракурсів, що змінюються з переміщенням точки спостереження, може бути настільки реалістичним, що часто не відрізняється від реального об'єкта.

У разі впровадження сучасних технологій голографічний метод фіксації інформації отримав можливість розкрити свій потенціал. Експонентне збільшення кількості наукових публікацій за результатами досліджень теорії голографії, її практичного застосування свідчить про інтерес до теми, її безперечну перспективність та актуальність.

В результаті аналізу опублікованих результатів науково-дослідних робіт було розроблено періодизацію розвитку голографічної технології. Було запропоновано до розгляду такі основні етапи.

Першим етапом, відправною точкою розгортання досліджень у галузі голографії, було відкриття Деннісом Габором голографічного методу запису інформації, його вивчення та підтвердження іншими вченими на експериментальному рівні.

Другий етап об'єктивно був пов'язаний з успіхом у дослідженнях, які розробляють інноваційні джерела світла, що дають достатню когерентність. Він може бути позначений як етап розвитку оптичної голографії. Оптична голографія, використовуючи явище інтерференції, записує інформацію про світлове поле, його інтенсивність, фазу світлової хвилі. Вся інформація про світло, що падає на носій запису, зберігається.

На цьому етапі був винайдений спосіб запису зображення в тривимірних середовищах, що дозволяє зберегти інформацію про фазу, амплітуду і спектральний склад хвилі, що прийшла від об'єкта. Він створив першу тривимірну голограму. Вона може бути відтворена при висвітленні пучком звичайного білого світла.

Третій етап, під час якого голографія отримала новий стимул розвитку, почався з використання лазера. Голографічний метод запису інформації набуває великого практичного значення та сприяє формуванню перспективного напрямку – лазерної голографії.

Для наступного етапу характерним був розвиток і оптичної, і лазерної голографії. Аналіз досліджень показав, що досить явно проявилася тенденція збільшення кількості робіт пов'язаних з розробкою різних методів створення голограм. Залежно від сфери їх застосування активно стали з'являтися нові види голографії – образотворча голографія, захисна голографія, динамічна голографія. Створення голограм стає доступнішим і, за аналогією з фотографічною справою, виникає і набуває популярності аматорська голографія. Унікальним для цього періоду можна назвати використання голографії як мистецтва та створення голографічних образів у мистецтві кінематографії.

П'ятий етап розвитку голографії можемо назвати цифровим. За

допомогою комп'ютерних технологій проводиться аналіз, синтез та моделювання хвильових полів. Цифрова голографія значно збільшує продуктивність та практичність голографічних методів.

Теоретичні розробки в галузі цифрової голографії дозволили створити унікальні за характеристиками прилади – голографічний телевізор, цифровий голографічний безлінзовий мікроскоп, голографічні окуляри, голографічну систему керування безпілотними літальними апаратами (дронами). З'являються голографічні мережеві програми, що є прямим розвитком цифрового етапу. Голографічний асистент та голографічна комунікація стають найпопулярнішими серед образів майбутнього для молоді.

Одним із найперспективніших напрямів є цифрова образотворча голографія. Досягається ефекту присутності в реальному часі, коли комп'ютерні програми синтезують кольорові об'ємні зображення об'єктів.

Проаналізовані нами дослідження, присвячені розвитку голографічних технологій, дозволили узагальнити вивчений матеріал у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хронологія розвитку голографічних технологій

Дата	Хронологія подій пов'язаних із розвитком голографічних технологій
1	2
1881	Альберт Міхельсон винаходить інтерферометр
1886	Французький фізик Габріель Ліппман розробив теорію використання світлових хвиль для передачі кольору у фотографії.
1891	Габріель Ліппман представив свою теорію "використання світлових хвиль для передачі кольору у фотографії", а також деякі прості приклади інтерференційних кольорових фотографій в Академії наук.
1893	Габріель Ліппман представив в Академії кольорові фотографії братів Люм'єр.
1894	Габріель Ліппман опублікував повну теорію. Габріель Ліппман опублікував свою теорію світлових хвиль для передачі кольору у фотографії.
1908	Габріель Ліппман отримав Нобелівську премію з фізики за «створення методу фотографічного відтворення квітів з урахуванням явища інтерференції».

Продовження таблиці 1.1

1	2
1947	Денешем Габором під час роботи в Британській дослідницькій лабораторії імені Томсона-Х'юстона вигадав назву «голографія» від грецького слова «holos» – «повний» та «graphie» – «пишу».
1948-1949	Денніс Габор публікує основні статті про реконструкцію хвильового фронту та народження голографії, але лазер ще не доступний.
1960	Американським ученим Ч. Таунсом було винайдено перший лазер, який мав велике практичне значення у розвиток голографії. Теодор Майман створює перший рубіновий лазер видимого світла.
1962	Роберт Холл, який працював у лабораторії General Electric у Скенектаді, винайшов напівпровідниковий інжекційний лазер, згодом названий лазерним діодом. Емметт Лейт та Юріс Упатнієкс розробляють голографію позаосьового пропускання на основі радара бічного огляду.
1964	Американські фізики Емметт Лейт та Юріс Упатнієкс із Мічиганського Технологічного Інституту записали першу об'ємну пропускну голограму, що відновлюється в лазерному світлі.
1965	Опубліковано першу статтю з голографічної інтерферометрії Powell & Stetson.
1966	Лейт і Упатнієкс у співпраці з дослідником Фріцем Горо розробили першу голограму, призначену для демонстрації здатності носія показувати об'єкти по різних кутах, здатну актуалізувати всі позитивні характеристики нового способу зберігання інформації.
1967	Ларрі Зіберт із Conductron Corporation створює першу голограму людини, використовуючи імпульсний лазер. Розроблено процес DCG для голографії. Видано Всесвітню книжкову енциклопедію, до якої увійшла перша серійна трансмісійна голограма. Б.Томпсоном було запропоновано нову схему для запису голограм Фраунгофера, яка була дуже схожа на схему Габора. З'являється динамічна голографія, цей напрямок, що поєднує голографію та нелінійну оптику, стає перспективним.
1968	Перші високоякісні голограми були виконані в США Л. Зібертом. Стівен Бентон розробив голографію передачі білого світла (райдуги). Цифрова голографія: Ломан запропонував синтезувати голограми за допомогою чисельних методів. Створено першу комп'ютерну голограму. Першу серію голограм художника Брюса Наумана представили у Галереї Ніколоса Уайлдера у Лос-Анджелесі у 1968 р.
1969	Стівен Бентон з Polaroid Research Laboratories (США) виготовив пропускну голограму, яку можна бачити у звичайному білому світлі.

Продовження таблиці 1.1

1	2
1971	Д. Габор отримав Нобелівську премію за «винахід та розвиток голографічного методу» з фізики, який він представив у 1947 році. Відкривається школа голографії у Сан-Франциско.
1972	Ллойд Крос почав розробляти мультиплексну голограму, яка повинна складатися з десятків ракурсів. Підготовлено інтегральну голограму «Поцілунок», за авторством Ллойдом Кросом. Привертає увагу поляризаційна голографія.
1974	Розроблено тиснення голограм.
1975	Починають дослідження у сфері спектральної голографії.
1976	Музей голографії відкривається у Нью-Йорку. Метод отримання райдужних голограм було запропоновано С.А.Бентоном. Теоретичне дослідження об'ємних високоефективних голограм складних хвильових полів: сформульовано модову теорію.
1977	Ллойд Крос в результаті досліджень розробив мультиплексну голограму, яка складається з безлічі звичайних фотографій об'єкта, зроблених з різних точок, що лежать в одній горизонтальній площині.
1983	На кредитній картці MasterCard з'являється перша голограма.
1984	Ключовою подією в галузі комерційної голографії стала публікація на обкладинці міжнародного видання National Geographic райдужної голограми.
1986	Абрахам Секе висуває ідею створення джерела когерентного випромінювання поверхні матеріалу з допомогою рентгенівського випромінювання.
1988	Бартон розробив новий метод відновлення тривимірного зображення, який ґрунтується на використанні фур'є-подібних інтегралів. National Geographic публікує повну райдужну голограму світу. Фотополімерна плівка, розроблена Polaroid, дозволяє здійснити масове виробництво голограм із дуже яскравим відображенням.
1990	Проведено перше відновлення тривимірного зображення атома.
1999	Geola патентує винайдені принтери для кольорового цифрового друку голограм за допомогою імпульсних лазерів.
2000	Перша цифрова кольорова голограма зроблена Geola за допомогою імпульсного RGB-лазера.

Продовження таблиці 1.1

1	2
2003	Медіа-лабораторія Массачусетського технологічного інституту розпочала розробку електрооптичної технології, яка дозволила графічному процесору в терміналі користувача створювати голографічні відеозображення в реальному часі з використанням недорогих екранів.
2005	Optware and Maxell розробили голографічний багатоцільовий диск, який використовує голографічний шар для зберігання даних до 3,9 ТБ. Перша кольорова портретна голограма, знята в Geola за допомогою обладнання HoloCam та надрукована на цифровому RGB-принтері.
2008	Розроблено шифрові голограми кампанією Geola, які були названі i-Lumograms - Integrated Light Writings
2013	Philips об'єднався із RealView для розробки голографічних зображень для кардіохірургії. Рішення дозволяє створювати тривимірне зображення «в повітрі» за допомогою ангиографа та ультразвукової кардіосистеми.
2016	Голографічний телевізор було запатентовано компанією Samsung
2015	Вперше представлені голографічні окуляри HoloLens від компанії Microsoft
2017	Verizon (США) та Korea Telecom (Південна Корея) здійснили перший міжнародний голографічний дзвінок за допомогою технології 5G.
2018	Німецькі дослідники створили голографічний електронний мікроскоп, що просвічує. Поєднали голографічні розробки з електронним мікроскопом, що просвічує.
2019	Компанія Accenture оголосила про створення голографічного віртуального асистента майстерні інновацій Liquid Studio Accenture MTC провела перший у світі двосторонній міжміський голографічний дзвінок на 5G)
2020	Пройшла презентація голографічна система управління безпілотними літальними апаратами (дронами)
2021	Студенти з Інституту космічних досліджень Університету Західного Онтаріо (Western Space) здійснили першу міжнародну голографічну телепортацію, або голопортацію, «вирушивши» з Онтаріо до Алабами.
2024	Посилення конкуренції в технологіях Micro OLED з доповненою і віртуальною реальністю

З 2024 року голографічні технології зазнали значного розвитку, що призвело до інновацій у різних сферах – від автомобільної промисловості до медицини та розваг. Розглянемо деякі з ключових досягнень.

Автомобільні голографічні дисплеї. Компанія AllFocal Optics розробила нанофотонічну лінзу, яка проектує зображення безпосередньо на сітківку ока, забезпечуючи чіткість навіть для людей із порушеннями зору. Jaguar Land Rover тестує цю технологію для покращення головних дисплеїв у автомобілях, зменшуючи час реакції водіїв і підвищуючи безпеку.

Hyundai Mobis представила повноекранний голографічний дисплей, який проектує інформацію про водіння та розваги на лобове скло, зменшуючи відволікання водія.

Голографічні окуляри та доповнена реальність. Meta презентувала прототип AR-окулярів Orion, які використовують нейроінтерфейс для керування за допомогою сигналів мозку. Ці легкі окуляри з полем зору 70° підтримують застосунки для відеодзвінків і мають потенціал замінити смартфони.

Дослідники з Принстонського університету та Meta створили компактний оптичний пристрій, який покращує якість голографічних зображень, дозволяючи інтегрувати їх у звичайні окуляри для створення нових видів віртуальної реальності.

Голографія в медицині та науці. Корейський інститут електроніки та телекомунікацій (ETRI) розробив процесор, який перетворює 2D-відео в реальні 3D-голограми в режимі реального часу, що може революціонізувати телемедицину та дистанційне навчання.

Chevron використовує голографічні технології для візуалізації підземних моделей нафтових і газових родовищ, що допомагає у прийнятті рішень щодо буріння та підвищує ефективність операцій.

Розваги та мистецтво. У сфері розваг голографічні концерти дозволяють глядачам відчувати присутність улюблених артистів у реальному часі. Також розробляються голографічні ігри з 3D-персонажами, які

взаємодіють з гравцями в реальному середовищі. У мистецтві з'явився термін "іколограма" – поєднання "ікон" (суб'єктів) і "голограм", що дозволяє створювати цифрові двійники артистів для нових форм виступів.

Наукові прориви. Дослідники з Concordia University розробили метод 3D-друку за допомогою акустичних голограм, який дозволяє створювати об'єкти всередині непрозорих поверхонь, відкриваючи нові можливості в медицині. Технологія HoloChrome використовує поліхроматичне освітлення для зменшення шуму в голографічних дисплеях, покращуючи якість зображення та розширюючи кольорову гаму.

Всі вищеперераховані досягнення свідчать про стрімкий розвиток голографічних технологій, котрі стають все більш інтегрованими в повсякденне життя, змінюючи способи взаємодії, навчання та розваг.

Отже, розглядаючи траєкторію розвитку засобів зв'язку відповідно до підвищення технологічного рівня системи комунікації, можна уявити графічно від стаціонарного телефону до голографічного типу комунікацій через етап використання мобільних засобів зв'язку та послідовно через етап відеоконференції.

В результаті проведеного аналізу існуючих досліджень можна зробити наступний висновок. Голографічний метод запису інформації, що лежить в основі голографічних технологій та голографічних комунікацій, лише починає розкривати свій потенціал. Багато сфер людської діяльності будуть кардинально змінені, отримані інноваційні продукти, виникнуть нові унікальні сфери діяльності, способи застосування голографії, якщо стратегічним напрямком стане реалізація принципу загальнодоступності цього методу запису інформації.

2 ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТРАФІКА

2.1 Використання технології щільного мультиплексування з поділом довжин хвиль DWDM

Голографічний тип комунікації відкриває нові можливості для різних сфер життя. У майбутньому ці технології можуть значно змінити спосіб взаємодії людей. Це інноваційний напрямок, який вимагає розробки спеціалізованого обладнання, забезпечує функціонування цих систем та високих вимог до мереж зв'язку.

Ціль даного етапу дослідження складається в наступному:

- послідовному вивченні 3D-відеотрафіку, трафіку мультимедіа і голографічного трафіку;
- зіставленні їх основних характеристик і вимог до мереж зв'язку;
- побудові моделі, наближеної до умов функціонування перспективної мережі зв'язку.

Підкреслимо, що завдання побудови мережі зв'язку є завданням вибору компромісу між якістю обслуговування трафіку і ресурсами, що виділяються для цього. Для її рішення необхідний вибір математичного апарату, специфіка якого визначається властивостями трафіку і системи обслуговування. Адекватність рішення цією завдання залежить, в зокрема, від знань властивостей трафіку.

Технологія щільного мультиплексування з поділом довжин хвиль (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) дає можливість вирішити проблему підвищення пропускної здатності мережі і ущільнення трафіку, мультиплексуючи кілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну. При цьому, для передачі різних потоків даних використовуються різні довжини хвиль. Для забезпечення застосування всього діапазону Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-T), Сектор стандартизації

електрозв'язку (the International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Сектор (ITU-T), визначив таблицю всіх довжин хвиль (і відповідних їм центральних частот). Таблиця розміщена в рекомендації ITU-T G.694.1.

Зазначимо, що системи DWDM дозволяють розширити існуючу смугу пропускання без прокладки застосункових волокон в оптичних кабелі. Можливості існуючою системи розширюються з допомогою мультиплексорів та демультимплексорів на кінцях системи.

Використання технології мультиплексування з щільним поділом довжин хвиль є перспективним, так як дослідники стверджують, що очікувано при еволюції даної технології будуть використані, як існуючі принципи суперканалу, так і більше потужна обробка сигналів, гнучкі мережеві рішення та спектрально ефективні методи передачі.

У моделі було використано наступне обладнання: камера Microsoft Kinect, два сервера, два комутатора Mikrotik, обладнання DWDM, проектор. Середовище передачі даних - оптоволокну – патч - корд SC- – комутаційний шнур UTP, 4-парний.

Для імітації роботи в мережі було підключено два сервера до комутаторів, які, використовуючи оптоволоконний кабель, з'єднуються по технології DWDM.

На підготовчому етапі експерименту вивчення параметрів трафіку проводилося з допомогою цифрового оптичного атенюатора, який дозволяє підтримувати певний діапазон згасання з можливістю вибору кроку 1 Дб. Досліджувалось згасання в 2 Дб, що тотожно, в даному випадку, десяти кілометрам.

Можливість формування 3D відео потоку, була реалізована з допомогою спеціального програмного інструменту – OBS Studio (Open Broadcaster Software). Для перехоплення і аналізу мережевого трафіку застосовувалася програма Wireshark. На віртуальному сервері були запуснені вебінтерфейси комутаторів для моніторингу трафіку, а також

зроблено знімки екран. SDN контролер віртуалізує рівень управління мережею.

Модель мережі представлена на рисунку 2.1.

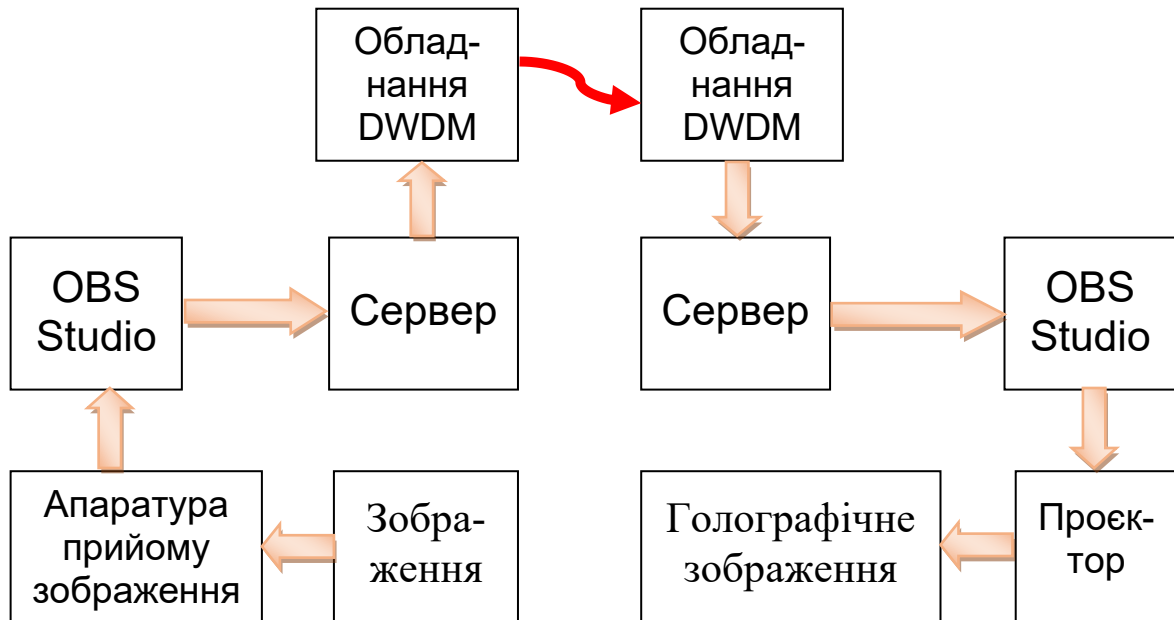


Рисунок 2.1 – Модель мережі для передачі 3d відеопотоку

Зроблене припущення про необхідність проведення порівняльного аналізу даних введення і висновку в процесі передачі 3D відеопотоку, дозволило прийти до наступної послідовності експериментального дослідження. Передаючи трафік з використанням технології DWDM під час натурального експерименту проводиться моніторинг і обробка даних на передавальній стороні та на приймаючій стороні.

При аналізі результатів вивчення трафіку були розглянуті наступні характеристики:

- довжини пакетів,
- RTT (час передачі пакету від відправника до одержувачу і назад),
- пропускна здатність.

Графік введення/виводу представлений на рисунку 2.2. Статистику передачі довжин пакетів узагальнено на рисунку 2.3. На рисунку 2.4 представлений графік показників пропускної здатності по результатах експерименту.

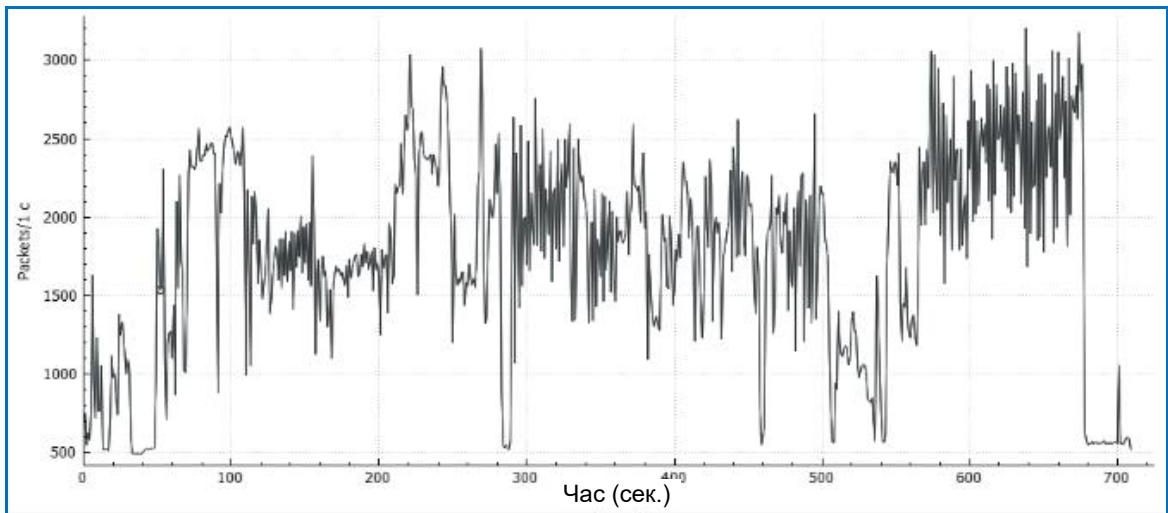


Рисунок 2.2 – Графік введення/виводу на передавальній стороні

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	1262468	887,71	54	1514	1,7784	100%	4,1600	638,445
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	492329	60,02	54	79	0,6935	39,00%	2,0800	638,591
80-159	1190	118,63	80	159	0,0017	0,09%	0,0400	130,880
160-319	2548	237,88	160	319	0,0036	0,20%	0,0400	68,967
320-639	50498	388,06	320	639	0,0711	4,00%	0,2100	269,083
640-1279	9342	954,96	640	1279	0,0132	0,74%	0,0400	0,845
1280-2559	706561	1502,89	1280	1514	0,9953	55,97%	2,4800	269,083
2560-5119	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
5120 and greater	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-

Рисунок 2.3 – Аналіз показників довжин пакетів після закінчення передачі

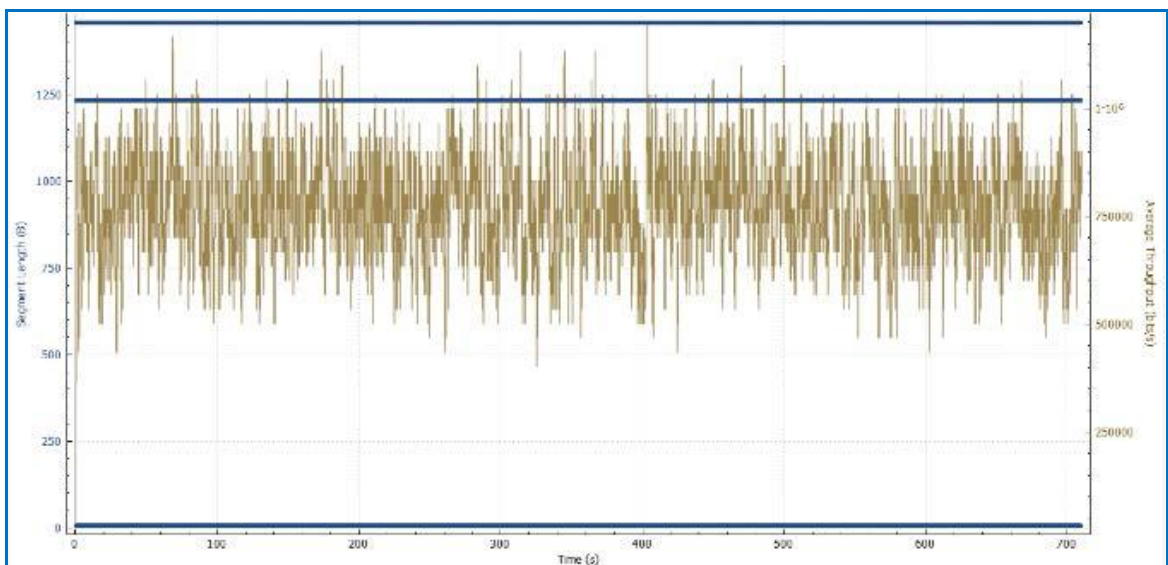


Рисунок 2.4 – Графік показників пропускної здатності

Розглядаючи наступну характеристику трафіку, наводимо показники RTT – часу передачі від відправника до одержувачу і назад. Результат відображено на рисунку 2.5.

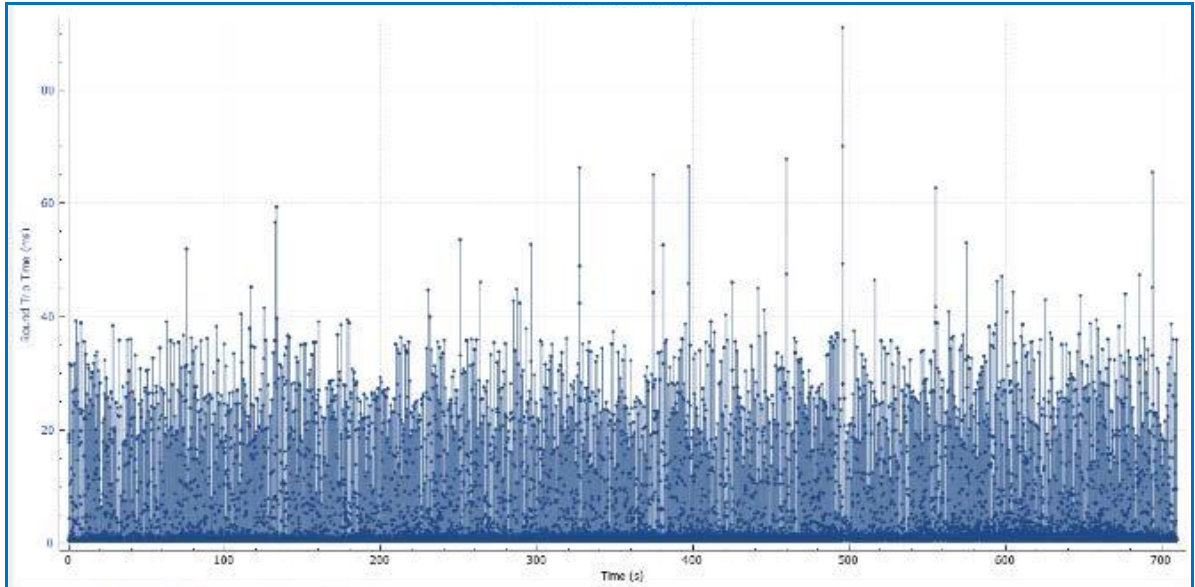


Рисунок 2.5 – Графік часу передачі від відправника до отримувача і назад

Далі наведено результати експерименту, зібрані за допомогою перехоплення пакетів на приймальному пристрої. На рисунку 2.6 можна бачити графік введення/виводу на приймаючій стороні.

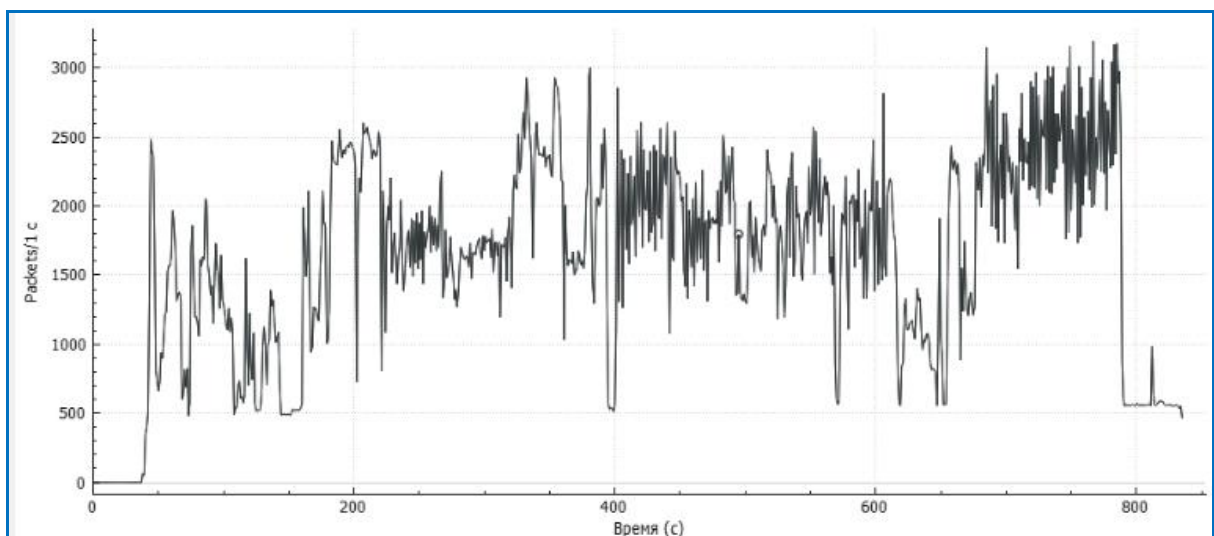


Рисунок 2.6 – Графік введення/виводу на приймаючій боці

Статистика на приймальній стороні наведено на рисунку 2.7.

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	1361328	883,43	42	1514	1,6287	100%	4,6900	771,840
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	533065	55,42	42	79	0,6378	39,16%	2,0700	749,889
80-159	1337	119,28	80	159	0,0016	0,10%	0,1400	38,300
160-319	2768	238,24	160	319	0,0033	0,20%	0,0400	125,170
320-639	54143	389,64	320	639	0,0648	3,98%	0,2300	355,996
640-1279	10429	954,66	640	1279	0,0125	0,77%	0,0500	407,417
1280-2559	759586	1502,43	1280	1514	0,9088	55,80%	2,5900	430,245
2560-5119	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
5120 and greater	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-

Рисунок 2.7 – Статистика довжин пакетів на приймаючій стороні

У результаті аналізу наукових публікацій, присвячених дослідженню мультимедійного трафіку, було зроблено припущення про необхідність проведення моніторингу трафіку відеопотоку і трафіку 3D відеопотоку. У зв'язку з цим, на другому етапі експерименту була проведена обробка і накопичення показників параметрів трафіку потоку 3D зображень.

На рисунку 2.8 показані результати моніторингу відеопотоку модельної мережі.

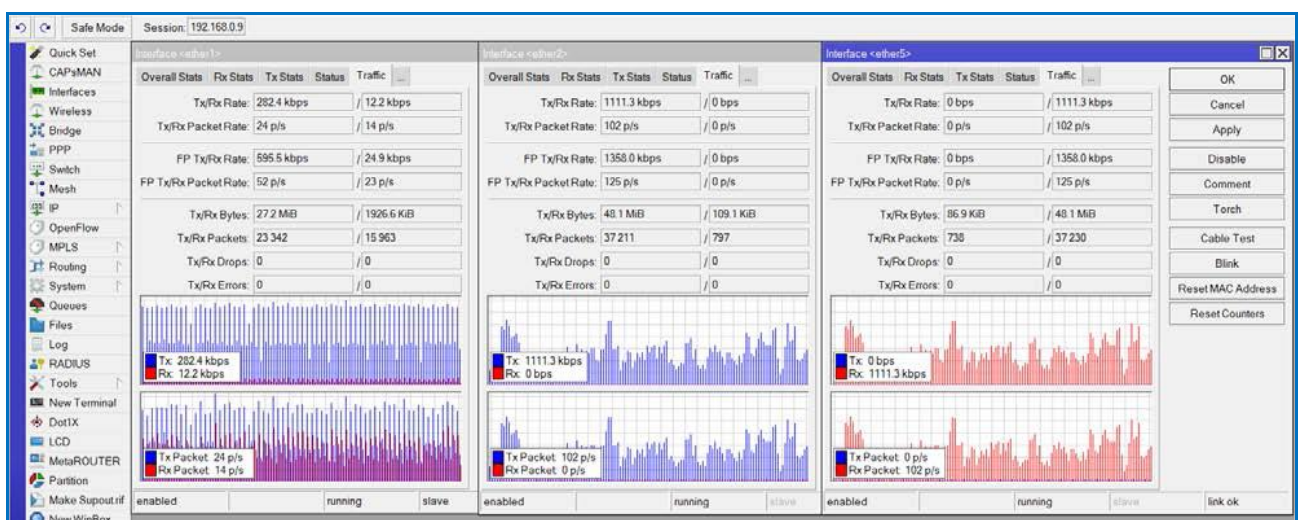


Рисунок 2.8 – Демонстрація результатів моніторингу відеопотоку

Результати передачі відеопотоку на передавальному боці наведено на рисунку 2.9.

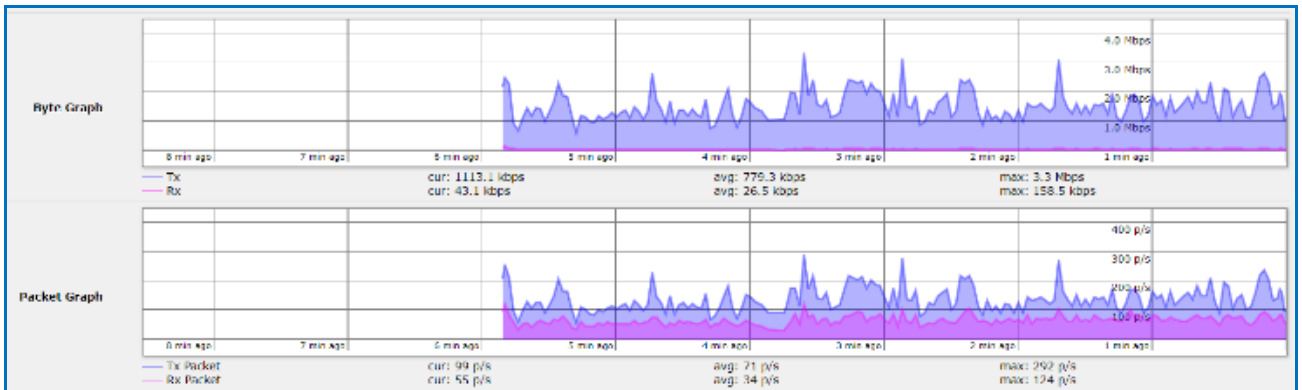


Рисунок 2.9 – Графічні результати передачі відеопотоку на передавальному боці

На приймаючому боці графік виглядає як показано на рисунку 2.10.

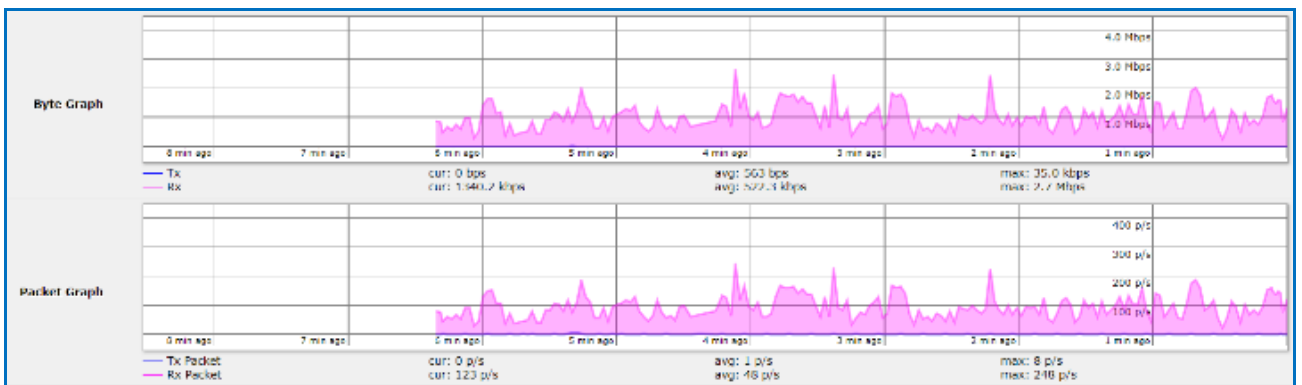


Рисунок 2.10 – Відеопотік на приймаючій стороні

Далі на рисунку 2.11 наведено результати моніторингу передачі трафіку 3D відеопотоку.

Графік передачі 3D відеопотоку на передавальній боці показаний на рисунку 2.12.

На приймаючому боці графік виглядає як показано на рисунку 2.13.

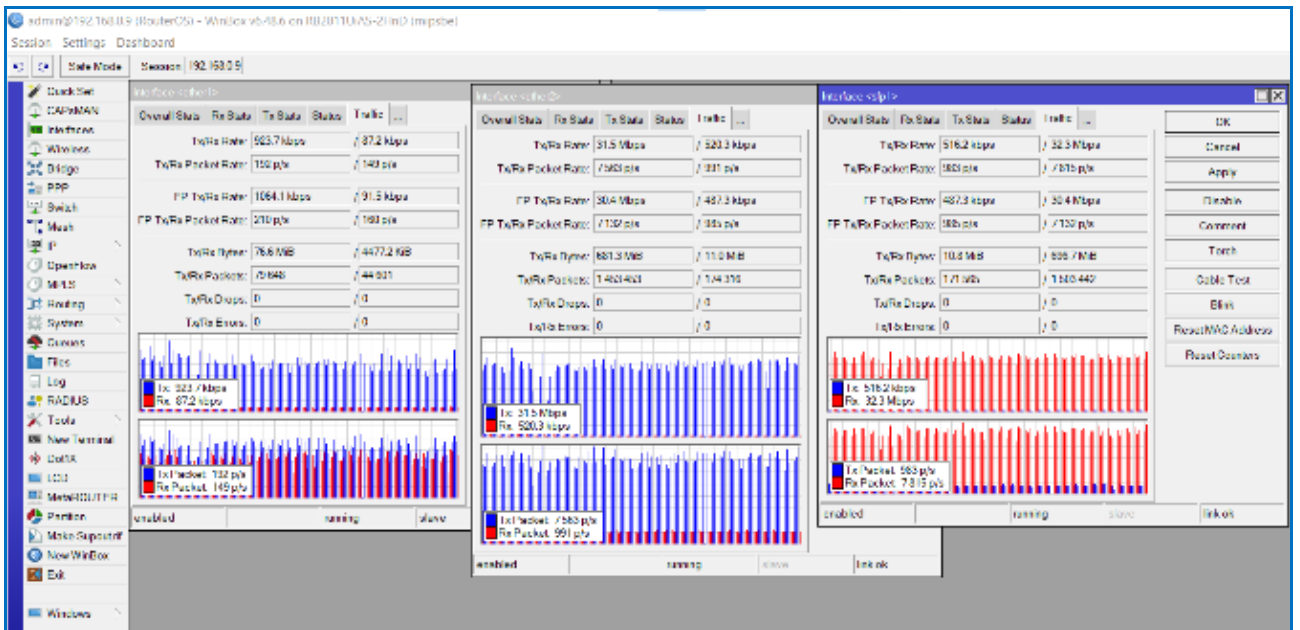


Рисунок 2.11 – Демонстрація результатів моніторингу передачі трафіку 3D відеопотоку

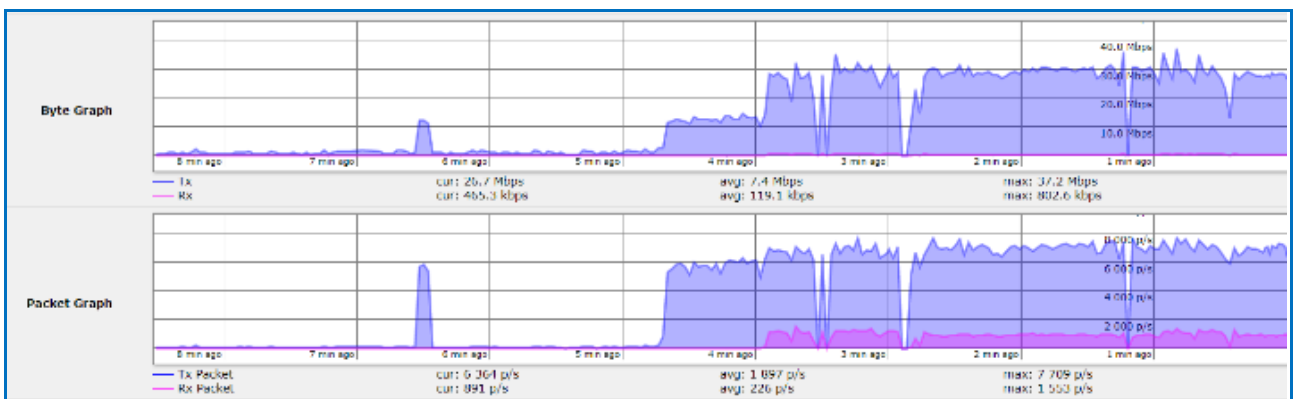


Рисунок 2.12 – Графік передачі 3D відеопотоку на передавальному боці

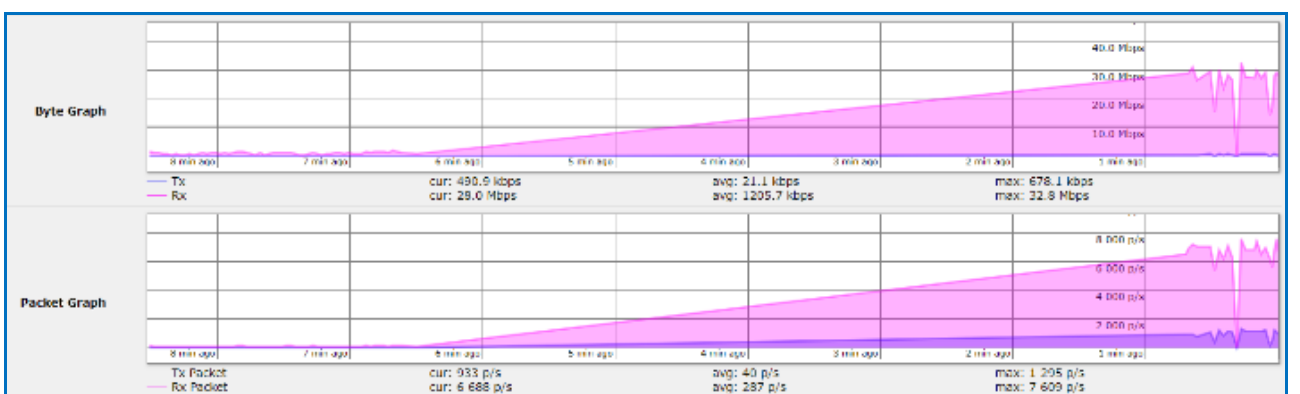


Рисунок 2.13 – Графік передачі 3D відеопотоку на приймаючому боці

2.2 Дослідження трафіку застосунків віртуальних аватарів

Зростаюче значення дослідження розвитку голографічних технологій може бути обумовлено переходом на новий етап впровадження сучасних технологій комунікації, який припускає активне використання голографічних проєкцій. Вони будуть затребуваними, а також і такий перспективний напрямок, як створення і використання голографічних аватарів.

Так, розглядаючи перспективи розвитку мереж зв'язку, автори зазначають, що «при використанні голографічних застосунків і аватарів буде можливо, наприклад, дивитися футбольний матч не по телевізору, а як голографічну модель під будь-яким кутом».

Змінні сучасні умови технічного обладнання, в яких розробляється теорія голографії, вимагають не тільки нових підходів до вивчення, але і аналізу досліджень голографічних технологій з крапки зору передачі даних в режимі реального часу для відтворення голографічних зображень.

Розглянемо інноваційну ділянку в спектрі розробок технологій 3D зображень – створення віртуальних аватарів. У умовах інформаційних ресурсів, що інтегруються в інформаційно-комунікаційному просторі, де доступ до інформації стає життєво необхідним, людина отримує можливість створити та зберегти свій цифровий профіль. На даному етапі, цей цифровий профіль, також названий як цифровий аватар, представляє собою набір біометричних і персональних даних. Біометричні дані - зображення особи, райдужна оболонка око, відбитки пальців і інші необхідні для ідентифікації особи. Персональні дані, як правило, містять наступну інформацію: прізвище, ім'я, по-батькові, стать, дату і місце народження, місце проживання, освіту, сімейне становище, займану посада і так далі. Однак, розглянуте поняття «цифровий аватар» має тенденцію до постійного розширення комплексу його змістовних елементів. Так, у мережі, цифровий аватар може представляти користувача через його анімаційне зображення

або збірний художній образ, мати опис інтересів, захоплень, життєвої позиції і таке інше.

«Аватар, – відзначають автори, вивчаючи дану наукову проблему, віртуальне тіло, яке представляє людей в ландшафтній середовищі, згенерованою комп'ютером, – це явище, яке з'явилося в цифрову епоху інтерактивних обчислень». Вони приходять до висновку, що в онлайн - чатах і на вебсайтах, а також в комп'ютерних іграх і віртуальних світах стає все більше поширеним взаємодія з іншими користувачами через ці штучно створені особи.

Деякі автори кажуть про "Аватарифікацію", котру визначають «як використання віртуальних самопрезентацій в опосередкованому середовищі з метою полегшення взаємодії в цьому середовищі» [11]. Вони акцентують увагу на тому, що термін «аватар» не є стандартизованим в академічній літературі.

Набагато більше чітко і сформульованим є термін «віртуальний аватар». Віртуальний аватар, як термін, трактується як фотореалістична 3D модель людини. Мова йде про віртуальну модель користувача. За ступенем реалістичності вона може бути низькополігональною, не відбивати емоції обличчя, не відображати деякі деталі зовнішності, а можливо і більш реалістичною, наприклад, анімаційні аватари. Розроблено графічні програми, що використовують готові зразки для анімації користувача (MetaHuman, Reallusion Character creator, DAZ3D). У даному дослідженні розглядаємо найбільш близьку до досконалості модель людини, яку називаємо її голографічним аватаром.

Голографічний аватар – це гіперреалістична 3D модель людини, створена по реальному прототипу користувача, з використанням програмних платформ штучного інтелекту, що забезпечують машинне навчання нейронної мережі. У відмінності від віртуальних цифрових аватарів, якими керують користувачі, голографічний аватар є повністю автономним, автоматизованим, який контактує з користувачем завдяки нейронній мережі.

Разом з тим, при активному впровадженні даної голографічної технології можуть виникати деякі складнощі.

Необхідно констатувати, що при передачі трафіку голографічних копій для отримання голографічних аватарів, обсяг його різко зростає. Достатньо часто спостерігається його наближення до границь максимальної пропускної здатності мережі зв'язку. У свою чергу, це може викликати перевантаження мережі. Такі пікові навантаження вимагають значного виділення великого обсягу ресурсів мережі одномоментно, разово.

Досліджуючи особливості трафіку застосунків для передачі через мережу анімованих аватарів, використовували розроблену модель передачі трафіку. Багатоплановий і багатоаспектний характер об'єкта дослідження – процес передачі голографічного трафіку, зробив необхідним позначити певні рамки вивчення і виділити його значущі етапи. У програмі позначили проведення вивчення двох варіантів передачі трафіку: мультимедійного контенту і голографічного контенту з наступним порівняльним аналізом. Для реалізації даного завдання була розроблена модель для трафіку застосунків віртуальних аватарів і мультимедійного трафіку. У даному дослідженні використовується таке визначення мультимедійного трафіку: під мультимедійним трафіком розуміється цифровий потік даних, який містить різні види повідомлень, що сприймаються органами почуттів людини (зазвичай звукова та/або відеоінформація).

Отже, розглянемо передачу цифрового потоку даних – мультимедійного трафіку. Передача відеопотоку здійснюється в реальному часі. Відеозображення представляє собою відеообраз, мультимедійний контент. Даний контент повністю готовий до відтворення на пристрої, що входить в систему технічних засобів моделі. Вищеназаний трафік вимагає певних ресурсів мережі зв'язку, збільшуючи навантаження на мережу передачі даних, тим самим збільшуючи вартість послуги. Для збереження якості обслуговування, при даному варіанті передачі відеопотоку, необхідно вносити зміни в параметри мережі, наприклад, збільшувати пропускну здатність і таке інше.

Зазначимо, що розвиток технологій і послуг зв'язку неминуче наводить до зміни властивостей абонентського трафіку. Це зміна визначається низкою факторів, таких як:

- зміна базових принципів реалізації послуг зв'язку во впроваджуваних технологіях;
- зміна набору послуг зв'язку;
- зміна попиту користувачів на послуги зв'язку;
- зміною проникнення технологій (числа користувачів);
- зміна вартості послуг зв'язку;
- зміна способів розрахунку вартості послуг.

Зробимо припущення, що навантаження на мережу в аналізованій моделі можна зменшити в випадку внесення змін в список функцій кінцевого, відтворюючого пристрою, з тим, щоб, згодом, при передачі голографічної копії, обладнання відтворювало необхідний образ анімованого об'єкту.

Отже, при передачі пакетів даних в експериментальній моделі необхідно мінімізувати навантаження на мережу. Для рішення даного завдання можна передавати тільки рухи об'єкту, тобто всі його рухи щодо просторових осей x , y , z . Для відтворення віртуального аватару обробка його рухів виробляється на відтворюючому пристрої, а не передається в пакетах даних по мережі. Анімаційний аватар, відтворений подібним чином не потребує регулювання розмірів, співвідношення його розмірів з розмірами об'єкту. Таким чином, в застосунку необхідно визначити головний об'єкт, з рухами якого буде проходити робота, позначити його початкове становище в обраною системі координат (x, y, z) , а також щодо інших об'єктів. Передавати дані, з зафіксованим рухом виділеного об'єкта, не торкаючись навколишніх об'єктів, не працюючи з ними. Використовуючи технологію штучного інтелекту, можна отримати можливість обробляти дані з відеокамери та виділяти тільки необхідний, позначений об'єкт передачі його руху.

Структурна лабораторного стенда представлена рисунку 2.14.

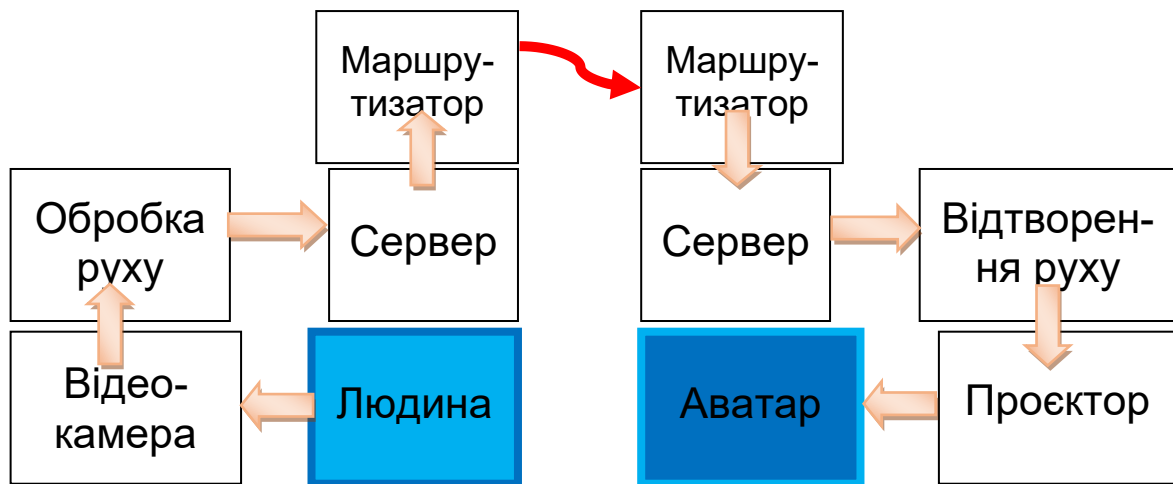


Рисунок 2.14 – Модель мережі для трафіку застосунків віртуальних аватарів та мультимедійного трафіку

Розглянемо модель мережі, розроблену для проведення експерименту по передачі трафіку застосунків віртуальних аватарів і мультимедійного трафіку. До складу технічних засобів входить наступне обладнання: відеокамера, яка записує інформацію, сервер, на якому обробляється записувана інформація в реальному часі і створюється віртуальний аватар. Далі використовується два маршрутизатора, для імітації середи передачі даних, які передають трафік на другий сервер. Другий сервер відтворює отриману копію віртуального аватару. Передавальний сервер обробляє тільки рух заздалегідь обраного об'єкт. Сервер відправляє дані по мережі на кінцеве пристрій, на якому виробляється обробка рухів та анімація сформованого аватару.

Для аналізу та збору трафіку було використано застосунок Wireshark .

Отримані значення довжин пакетів по результатам передачі даного трафіку наведені на рисунку 2.15.

Topic / Item	Count	Average	Min Val	Max Val	Rate (ms)	Percent	Burst Rate	Burst Start
Packet Lengths	246750	1686,28	42	40934	0,4429	100%	11,2400	340,393
0-19	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0,0000	0,00%	-	-
40-79	201589	60,03	42	78	0,3619	81,70%	6,3800	340,393
80-159	354	117,16	80	159	0,0006	0,14%	0,4600	343,083
160-319	343	231,58	160	319	0,0006	0,14%	0,0700	205,413
320-639	312	437,66	320	639	0,0006	0,13%	0,0900	339,486
640-1279	608	957,59	643	1279	0,0011	0,25%	0,0800	340,413
1280-2559	3317	1785,47	1280	2557	0,0060	1,34%	4,1200	340,393
2560-5119	19120	4131,04	2560	5117	0,0343	7,75%	0,4900	340,399
5120 and greater	21107	15077,54	5120	40934	0,0379	8,55%	0,6600	342,049

Рисунок 2.15 – Довжини пакетів мультимедійного трафіку

На рисунку 2.16 відображено інтенсивність передачі пакетів мультимедійного трафіку.

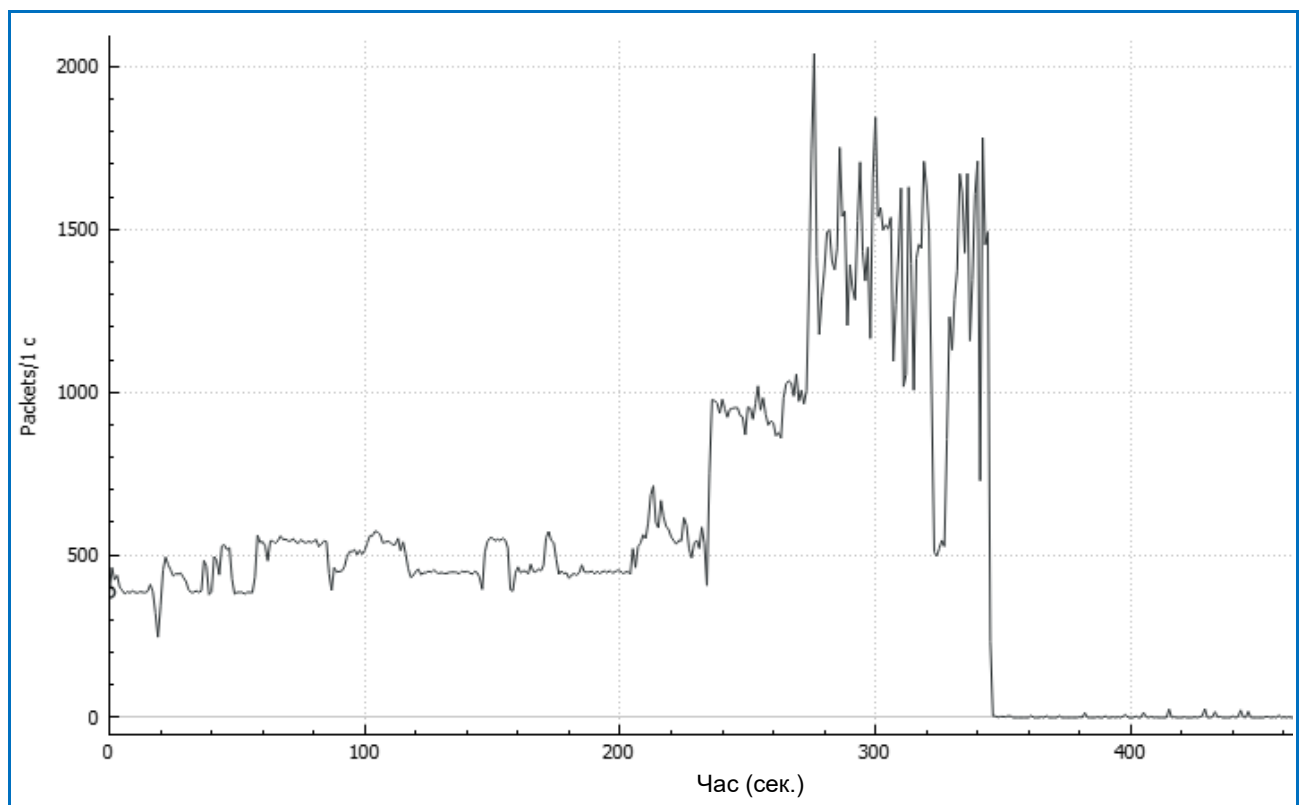


Рисунок 2.16 – Інтенсивність мультимедійного трафіку

На рисунку 2.17 відображена інтенсивність передачі пакетів застосунків віртуальних аватарів.

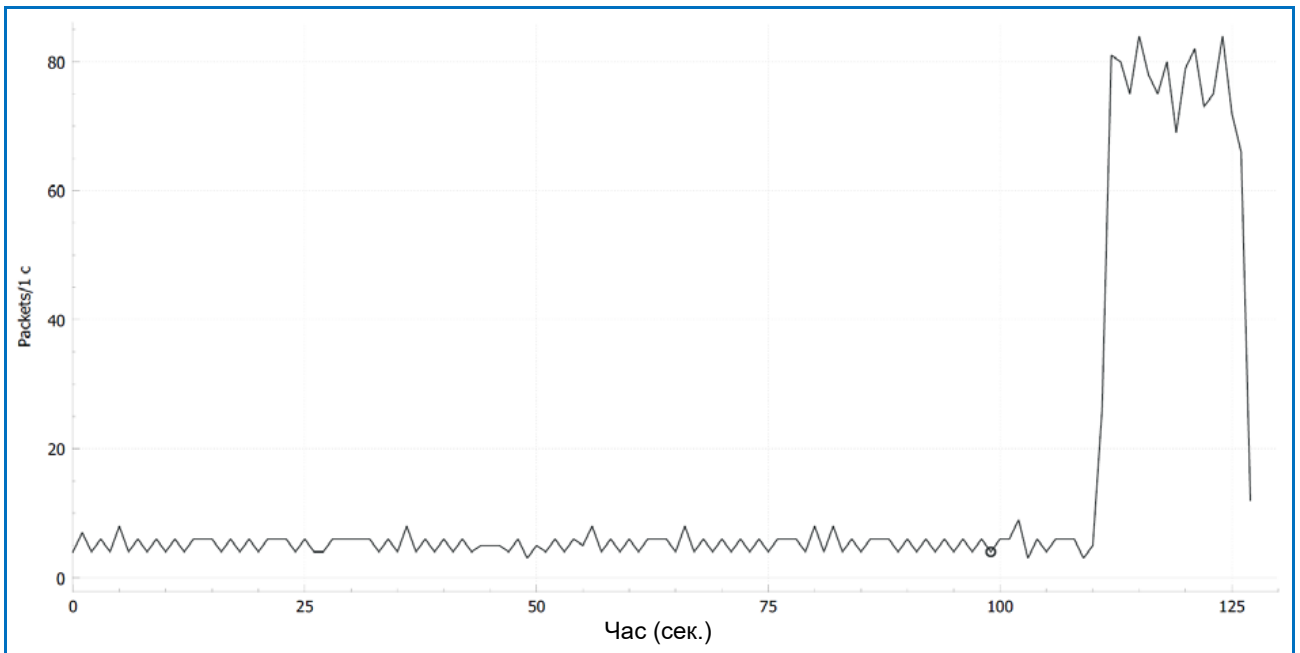


Рисунок 2.17 – Графік трафіку застосунків віртуальних аватарів

Пояснити наявність пульсації в кінці роботи тестування, можна збільшенням оброблюваних точок рухів. Проводиться анімація рухів корпуси та кінцівок об'єкта у всіх площинах системи координат.

Якщо проаналізувати отримані графіки, можна зробити два виведення. Перший – потоки мають явні відмінності. Графіки представлені в різних інтервалах вимірювання. Діапазон інтервалів різниться на порядок. Це показує, що у другому варіанті програми, використаний обсяг трафіку на порядок менше, чим в першому варіанті. З цього, можна зробити висновок, що запропонований варіант, має ресурсозберігаючий характер.

Другий висновок – збільшення рухової активності об'єкта наводить до зростання обсягів переданого трафіку, що достатньо значимо для використання ресурсів мережі.

Запропонований варіант роботи моделі, також має деякі недоліки. Потрібно більше обчислювальних потужностей обладнання, обробляючого рух об'єкту моделі. Для персональних комп'ютерів це означає збільшення витрати батареї, збільшення завантаженості оперативною пам'яті, або зовсім неможливість використовувати деякі застарілі моделі пристроїв.

Резюмуючи, необхідно акцентувати увагу на наступних значимих положеннях. Комплексний підхід, реалізований в дослідженні, дозволив зробити висновок про недостатній масштаб поширення технології застосунків голографічних аватарів.

2.3 Дослідження процесів обслуговування трафіку 3D відеопотоку з використанням оптоволоконного кабелю

Передача різних видів трафіку безпосередньо пов'язана з дослідженням проблеми впливу середовища передачі даних на якість обслуговування. Можна виділити три типу середовища передачі даних, а саме:

- електричні (мідні) кабелі на основі кручених пар проводів (twisted pair);
- бездротова середовище (wi-fi);
- оптоволоконні кабелі (Fiber optic).

Розглянемо об'єктивно властиві особливості середовища передачі даних. Зупинимося на трьох найбільш важливих із них:

- смуга пропускання (частотний діапазон сигналів) і згасання сигналу; дані характеристики безпосередньо пов'язані між собою, підкреслимо, що зі збільшенням частоти сигналу зростає його згасання;
- завадозахищеність середовища передачі;
- швидкість розповсюдження сигналу.

Трафік, як процес переміщення даних через мережу, також, в залежності від середовища, в якому відбувається передача, може бути провідним і бездротовим. Використовуються різні технології і протоколи (IEEE 802.3 (Ethernet), TCP/IP). Провідні мережі забезпечують високу швидкість передачі даних (від 10 Мбіт/с до 100 Гбіт/с і вище) і надійне з'єднання. Для передачі трафіку використовують оптоволоконний кабель, кручена пара (Cat5e, Cat6, Cat6a і т.д.), коаксіальний кабель.

Оптоволоконні мережі використовують світлові імпульси для передачі даних, що дозволяє досягти дуже високих швидкостей та визначає основні, властиві їм, переваги:

- високу стабільність з'єднання;
- низьку затримку;
- високу швидкість;
- надійність;
- безпеку передачі даних.

На даному етапі дослідження, в моделі для вивчення трафіку, як середовища передачі був обраний оптоволоконний кабель.

Виходячи з положення про те, що для експериментального дослідження необхідно створити умови для відтворення явища з мінімальним зовнішнім впливом, була розроблена і апробована модель для спостереження за поведінкою трафіку, з метою перевірки певних сформульованих припущень.

Експеримент мав на увазі дослідження передачі зображення одного рухається об'єкта на однотонному тлі та передачі двох об'єктів у русі на одному і тому ж однотонному фоні, з подальшим порівнянням.

Для створення трафіку 3D відеопотоку на першому етапі була використана камера RGB-D, яка фіксувала рух однієї людини. Трансляцію і відтворення здійснювали за допомогою програми OBS Studio.

У моделі до мережі передачі даних додані дві імітації комутаторів, на яких були реалізовані віртуальні комутатори з підтримкою openflow. Спостереження трафіку на приймаючому комутаторі здійснювали з допомогою віртуального сервера з технологією SDN.

Результати моніторингу послідовно представлені на рисунках 2.18 і 2.19.

Трафік передачі одного рухомого об'єкту на зелений фон наведений на рисунку 2.18.

Трафік передачі двох рухомих об'єктів на такий, як і у попередньому експерименті, зелений фон наведено на рисунку 2.19.

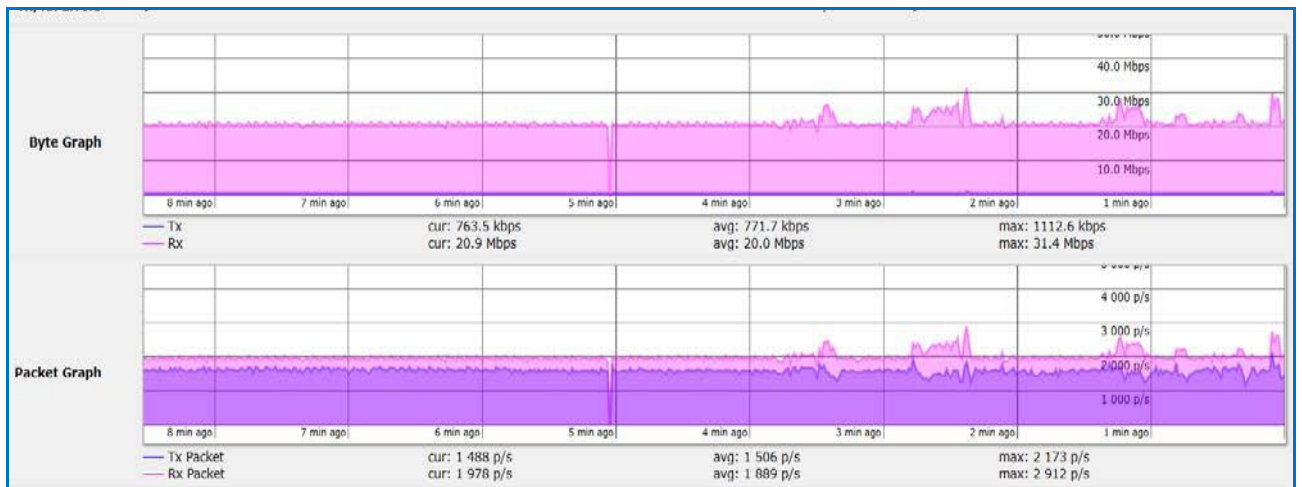


Рисунок 2.18 – Графік моніторингу при передачі одного рухомого об'єкта на зелений фон

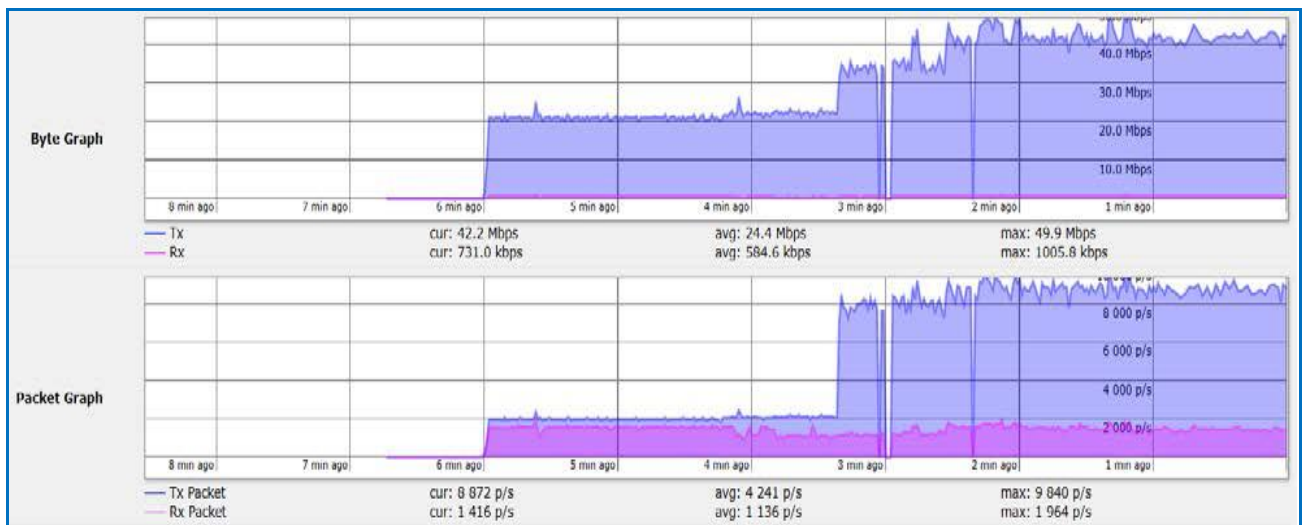


Рисунок 2.19 – Графіки моніторингу при передачі двох рухомих об'єктів на зелений фон

Для передачі двох рухомих об'єктів на зеленому фоні знадобилося в два рази більше пропускної здатності каналу, це можна спостерігати на рисунку 2.19.

На рисунку 2.18 можна відзначити, що початок передачі вимагає 20 Мбіт/с пропускної здатності. Це відбувається в зв'язку з тим, що об'єкти

починали руху плавно. Для передачі 3D відеопотоку, для людини, що рухається з високою швидкістю, в прискореному темпі руху, хаотично, потрібно більше 40 мегабіт на секунду.

У результаті експериментального дослідження була підтверджено робоча гіпотеза про необхідну пропускну здатність для передачі трафіку 3D відеопотоку.

Розроблені для експериментального дослідження моделі можуть бути використані для моніторингу поведінки трафіку при передачі даних, з наступним аналізом взаємозалежностей різних властивостей трафіку 3D відеопотоку в режимі реального часу.

Перспективним напрямом подальшого дослідження може бути проведення порівняльного аналізу передачі трафіку 3D-відеопотоку з допомогою технології SDN та Openflow і без їхнього використання.

2.4 Дослідження передачі трафіку 3D відеопотоку з використанням бездротового середовища (Wi-Fi)

Сучасна тенденція розширення сфери використання (Wi-Fi) в якості середовища передачі даних зумовили необхідність вивчення трафіку 3D відеопотоку і забезпечення інноваційних послуг голографічного типу комунікації. Мобільність, простота розгортання, низька вартість установки, можливість створення громадських точок доступу і підключення пристроїв Інтернету Речей (IoT) підтверджують перспективність подальшого розвитку цією технології.

Досліджуючи передачу голографічних копій в різних середовищах, необхідно провести також вивчення передачі голографічного контенту, використовуючи Wi-Fi. Для моделі взаємодія між комутаторами здійснювалося по бездротовому каналу. Далі наведено графічні матеріали моніторингу трафіку на комутаторів.

Результати передачі 3D відеопотоку на передавальній боці наведено на рисунку 2.20.

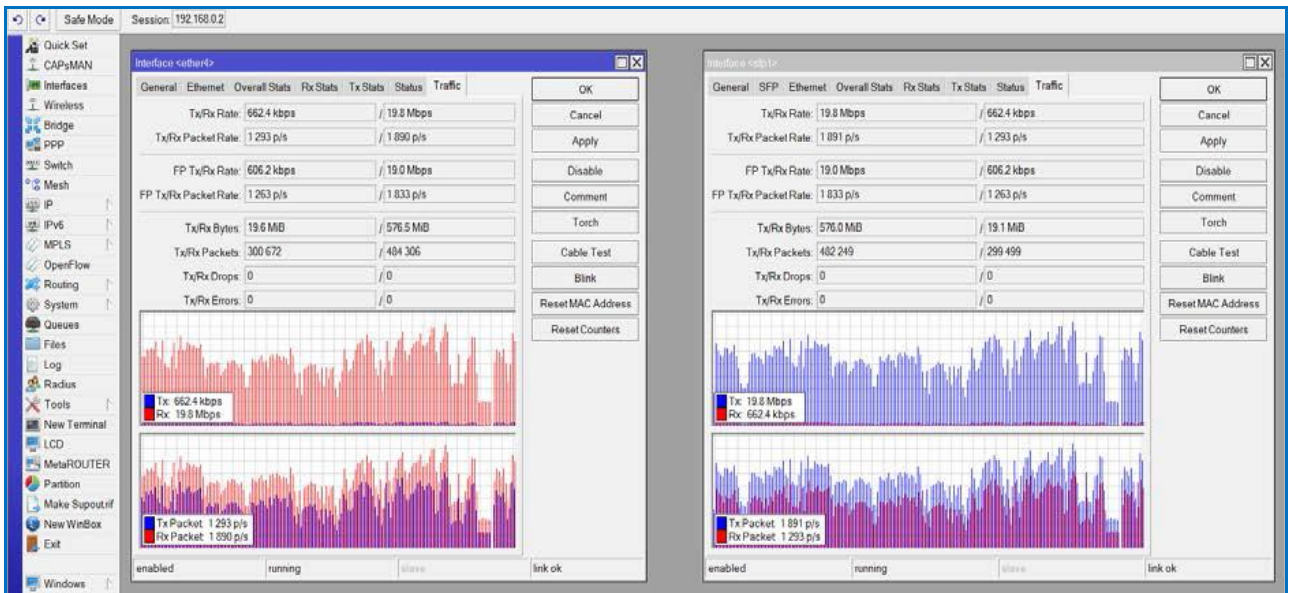


Рисунок 2.20 – Результати моніторингу передачі 3D відеопотоку на комутаторах

Інтенсивність передачі пакетів протягом сеансу спостережень представлена на рисунку 2.21.

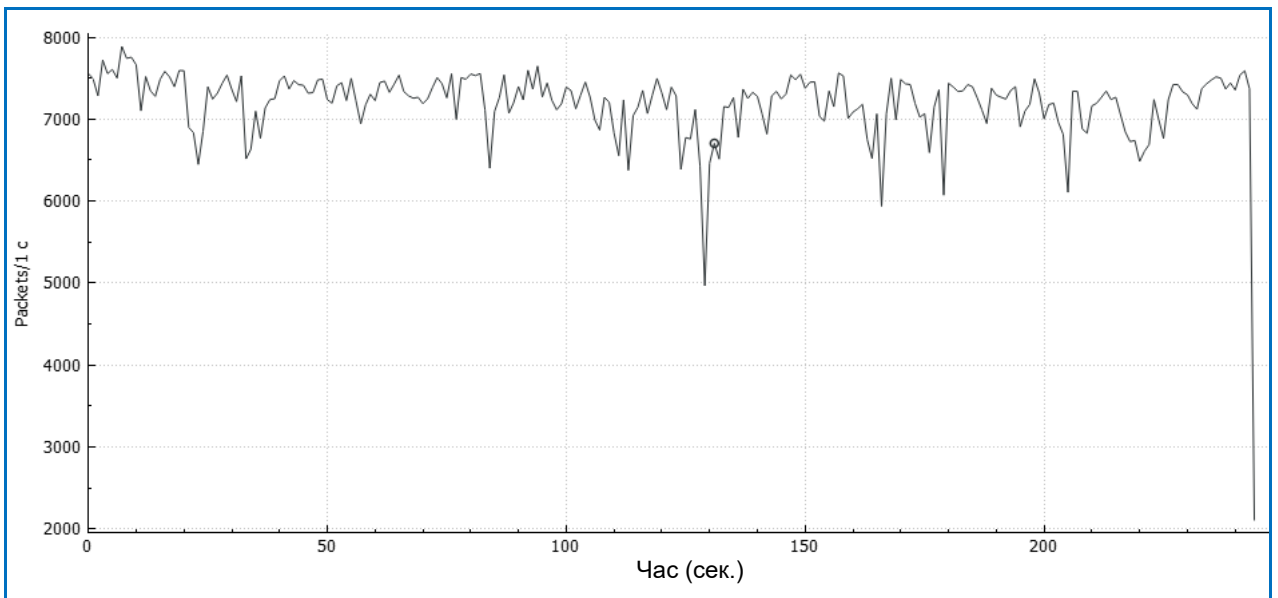


Рисунок 2.21 – Інтенсивність передачі пакетів протягом сеансу спостережень.

На рисунку 2.22 представлені довжини пакетів, зібрані за допомогою програмного забезпечення Wireshark .

Довжина пакету	Кількість	Середнє	Min	Max	Швидкість	%	Вихід швидк. початок	
Пакет Длина	332011	707,26	42	1514	2,1683	100%	4,92	128,49
0-19	0	-	-	-	0	0,00%	-	-
20-39	0	-	-	-	0	0,00%	-	-
40-79	472639	69,13	54	79	1,9347	26,85%	4,32	92,017
80-159	334	115,67	80	159	0,0014	0,02%	0,05	205,185
160-319	620	237,39	160	319	0,0025	0,04%	0,04	72,091
320-639	1237	483,34	320	639	0,0051	0,07%	0,04	9,625
640-1279	3703	1004	640	1279	0,0152	0,21%	0,04	0,266
1280-2559	1281783	1512,14	1280	1514	5,2469	72,82%	8,15	234,599
2560-5119	0	-	-	-	0	0,00%	-	-
5120	0	-	-	-	0	0,00%	-	-

Рисунок 2.22 – Довжини пакетів трафіку передачі даних

Отже, при використанні бездротового середовища передачі даних (Wi-Fi) між комутаторами можливе погіршення якості відтворення голографічного контенту. Тому для впровадження даної технології в масове користування необхідно вирішувати завдання підвищення стійкості мережі до пікових навантажень і впливу зовнішнього середовища.

2.5 Дослідження передачі трафіку 3D відеопотоку з використанням технології Ethernet

Для проведення експерименту була побудована модель мережі, до складу якої входить наступне обладнання:

- камера-сенсор Microsoft Kinect, яка дозволяє виробляти запис руху об'єкта в реальному часу;
- два сервера;
- два комутатора Mikrotik (SW#1, SW#2);
- голографічний лазерний проектор LG з підтримкою 3D для відтворення об'ємного зображення.

Середовище передачі даних між комутаторами – оптоволокну, між комутатором та сервером – патч-корд SC-SC або комутаційний шнур UTP

чотирипарний cat.5e 3.0м, так як в мережах доступу використовується кручена пара.

Відеотрафік був отримано при допомоги 3D- камери Microsoft Kinect (Full HD (1920 на 1080)). Формування 3D-відео потоку було реалізовано за допомогою спеціального програмного інструменту - OBS Studio (Open Broadcaster Software). Для перехоплення і аналізу мережевого трафіку застосовувалася програма Wireshark. На віртуальному сервері були запуснені веб- інтерфейси комутаторів для моніторингу трафіку. Для віртуалізації рівня управління мережею був реалізований SDN контролер.

На рисунку 2.23 наведено графік, демонструючий динаміку зміни інтенсивності пакетів за сеанс спостереження (350 секунд – загальний час фіксації трафіку). Трафік був отримано при фіксації 3D-камерою рухів людини і передачі отриманого відеозображення через модельну мережу на лазерний голографічний проектор для відтворення.

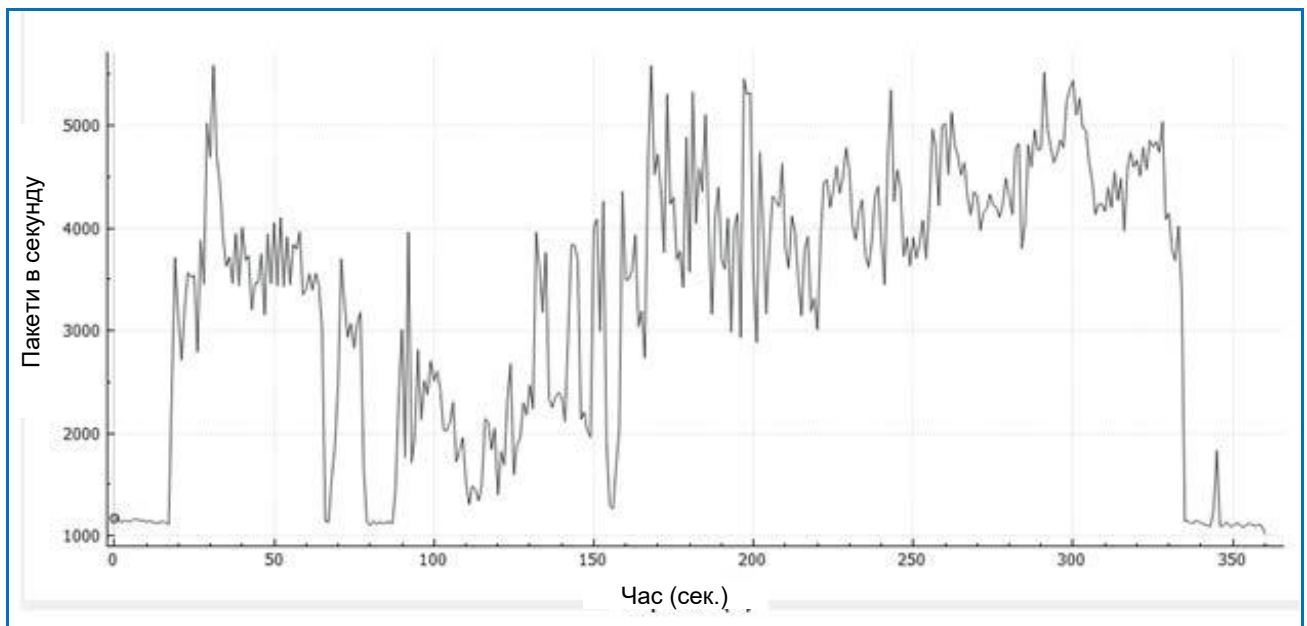


Рисунок 2.23 – Інтенсивність передачі пакетів протягом сеансу спостережень

Основні параметри досліджуваного трафіку наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Чисельні значення параметрів трафіку

Параметр	Значення
Інтенсивність пакетів	3290,7 ± 113 пакетів/с
Інтенсивність трафіку	32,3 ± 1,1 Мбіт/с
Середній розмір пакету	1226 ± 1 байт
Загальна кількість пакетів, що спостерігаються	1151745 шт.
Тривалість спостережень	350 с
Загальний обсяг трафіку	1412,04 Мбайт

На рисунку 2.24 наведено гістограму, котра ілюструє розподіл довжин пакетів.

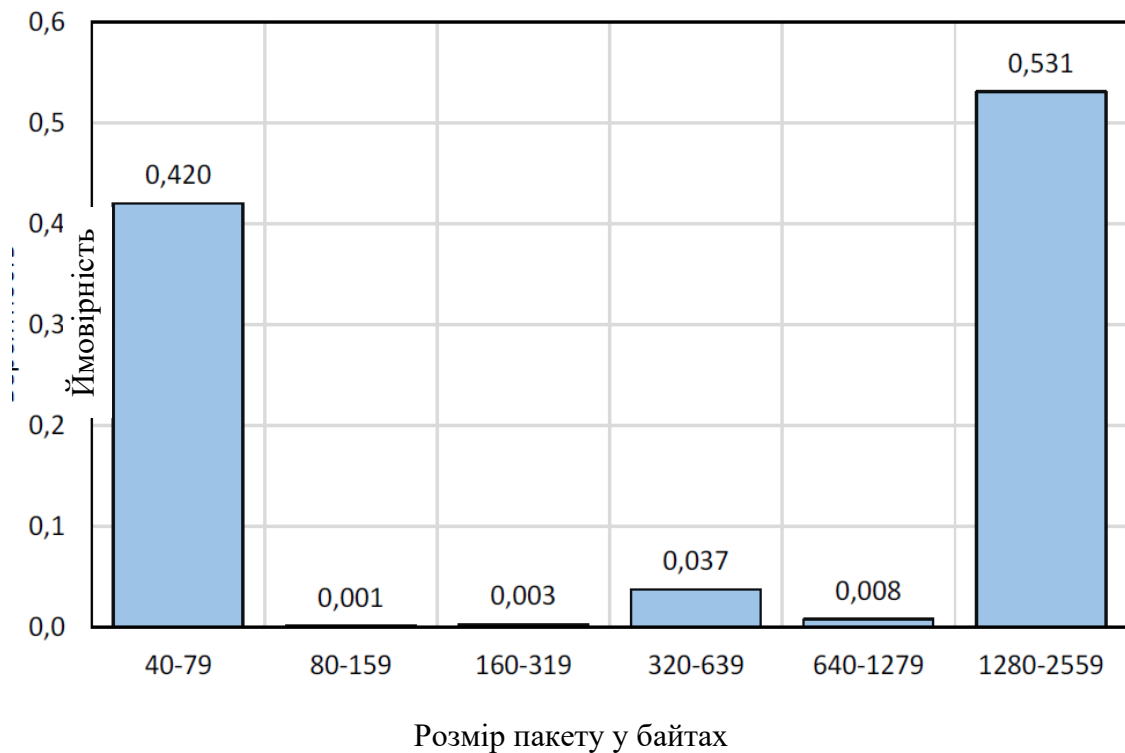


Рисунок 2.24 – Розподіл довжин пакетів

З наведеною гістограми видно, що найбільшу частку пакетів (більше 95%) складають пакети розміром від 40 до 80 байт і пакети розміром від 1280 до 2560 байт. Середня довжина пакету і середньоквадратичне відхилення від її склали 1226 байт і 544 байт відповідно. Цей результат має значення для опису моделі обслуговування потоку мережею як системою масового обслуговування в частини вибору моделі часу передачі пакету.

3 ОБСЛУГОВУВАННЯ ГОЛОГРАФІЧНОГО ТРАФІКУ В МЕРЕЖАХ СПІЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

3.1 Дослідження характеристик мережевого трафіку

Одним з способів описи випадкових потоків є визначення його автокореляційної функції (АКФ), яка наочно описує залежність справжнього стану процесу від його минулого, що дозволяє розширити уявлення про властивостях випадкового потоку. АКФ обчислюється за такою формулою:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (X_i - \bar{X}) \cdot (X_{i+k} - \bar{X})}{(N - \tau) \cdot \sigma^2(X)}, \quad (3.1)$$

де \bar{X} – вибіркова середня, а $\sigma^2(X)$ – вибіркова дисперсія ряду X ; $k = 0, 1, 2, N$ – кількість вимірювань; τ – зсув.

На рисунку 3.1 відображена автокореляційна функція потоку на інтервалі від 0 до 50 мс .

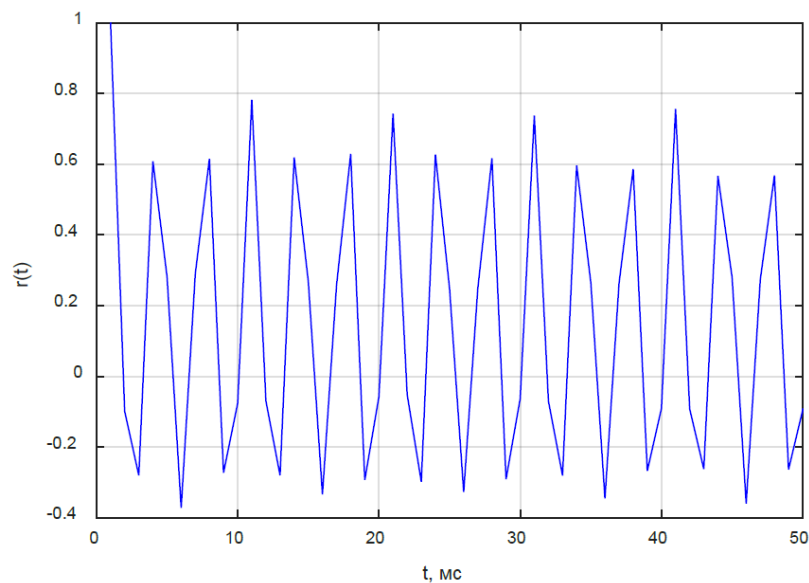


Рисунок 3.1 – АКФ потоку на інтервалі від 0 до 50 мс

Як видно з рисунку 3.1, на даному інтервалі АКФ представляє собою функцію з вираженою періодичністю. Це дозволяє припустити подібність процесів передачі пакетів для різних інтервалів часу. На рисунку 3.2 наведено АКФ для інтервалу часу від 0 до 30 с.

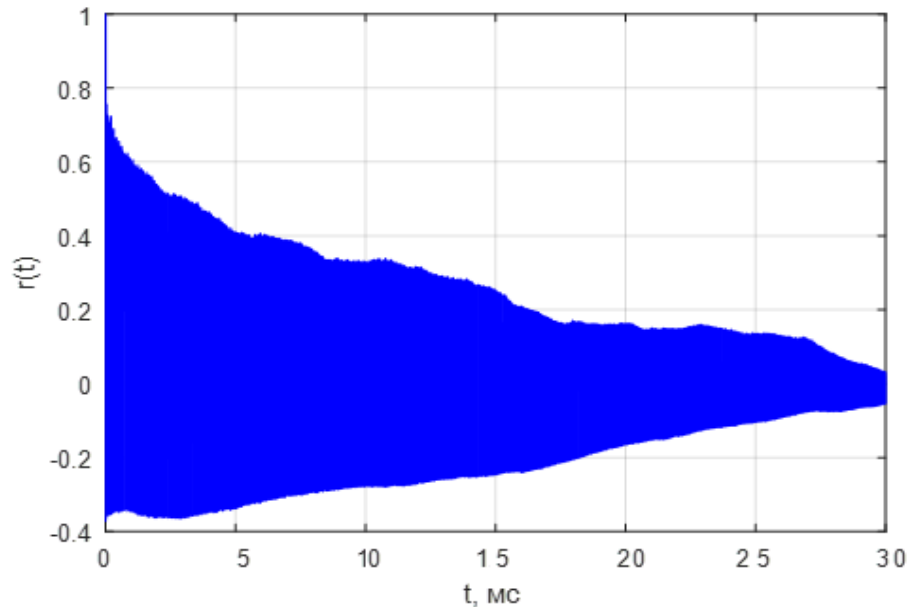


Рисунок 3.2 – АКФ потоку на інтервалі від 0 до 30 с

З графіка на рисунку 2.26 видно, що значення АКФ повільно зменшується в течії часу спостереження, при цьому функція зберігає властивості періодичності на всьому інтервалі спостережень.

На рисунку 3.3 представлена гістограма розподілу інтервалів часу між пакетами. З рис. 3.3 видно, що розподіл довжин пакетів має мультимодальний характер.

Щільність ймовірності інтервалів часу між пакетами описується змішаним розподілом виду:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \eta_i \cdot f_i(x_i), \quad \sum_{i=1}^k \eta_i = 1, \quad (3.2)$$

де η_i – чисельний коефіцієнт; $f_i(x_i)$ – значення функції щільності імовірності на отриманих відліках.

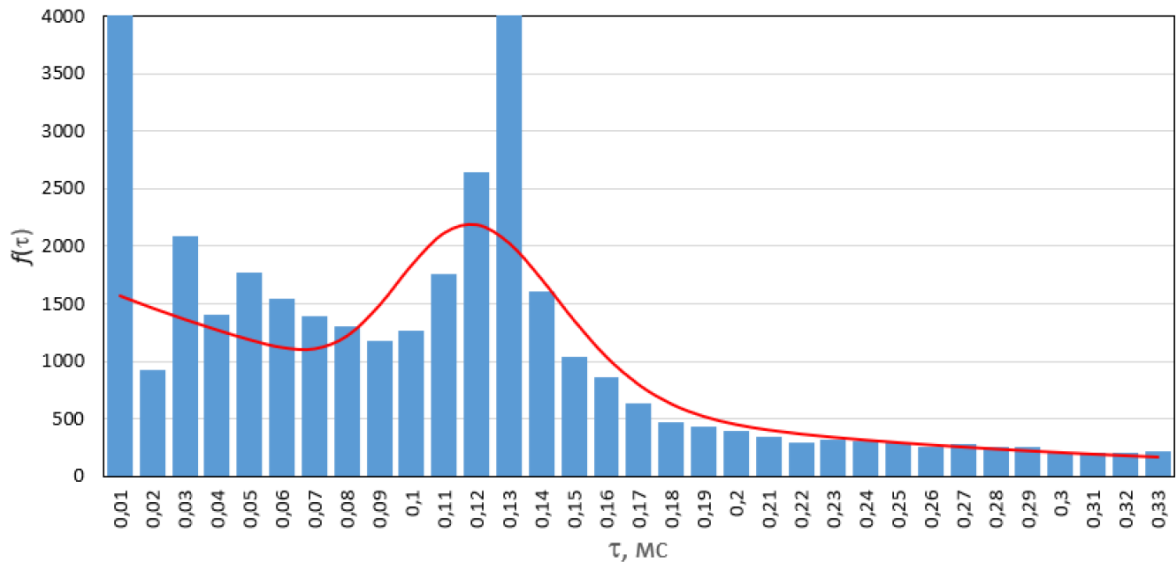


Рисунок 3.3 – Розподіл інтервалів часу між пакетами та їх функція щільності ймовірності

У наведеній апроксимації (червона крива на рис. 3.3) $k = 2$; $f_1(x)$ є щільністю ймовірності експоненційного розподілу, а інші функції $f_i(x)$ – щільності ймовірності відповідних гамма – розподілів.

Чисельні значення параметрів розподілу наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Чисельні значення параметрів розподілу

k	η_i	θ_i	β_i
1	0,4	0,00014	1
2	0,6	$5 \cdot 10^{-6}$	25

Для отриманих результатів змін часового ряду була зроблена оцінка властивостей самоподібності шляхом обчислення параметра Херста, який характеризує потік і є мірою тривалості довгострокової залежності процесу. Для кожного часового ряду можна обчислити його показник Херста як коефіцієнт регресії логарифма нормованого накопиченого розмаху до логарифму довжини вибірки. Детермінація такої регресії покаже, з який точністю досліджуваний процес можна апроксимувати процесом Херста. Для визначення параметра Херста H зокрема використовують метод R/S - аналізу часових рядів:

$$R/S = \left(\frac{N}{2}\right)^H, \quad (3.3)$$

де R – розмах часового ряду, S – середньоквадратичне відхилення, N – обсяг вибірки. На рис. 3.4 наведено залежність логарифма нормованого розмаху (R/S) від логарифму розміру часового інтервалу.

Співвідношення R/S

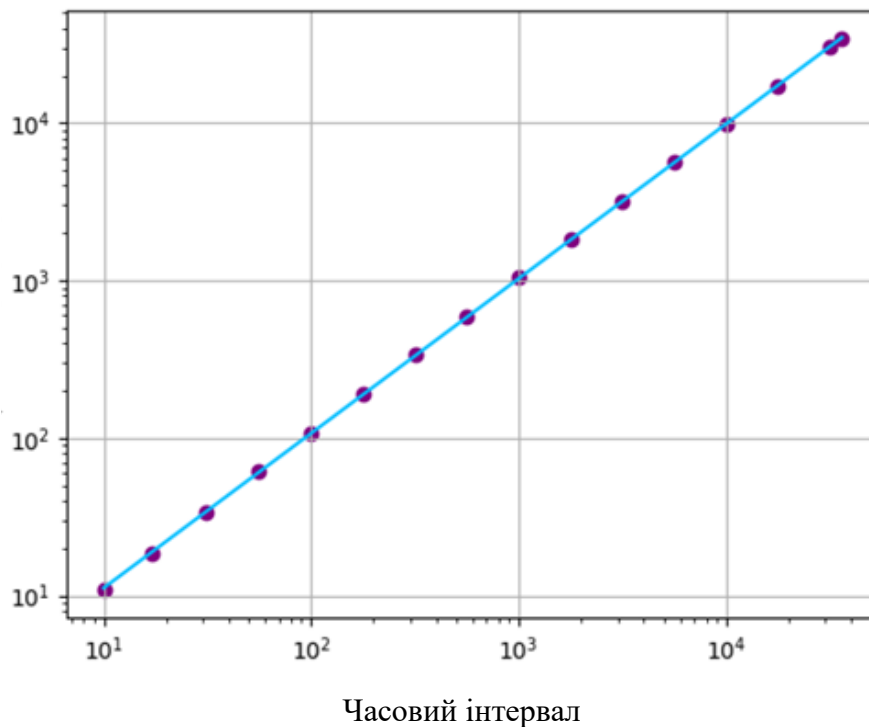


Рисунок 3.4 – Залежність логарифма нормованого розмаху (R/S) від логарифма розміру часового інтервалу

Для оцінки параметра Херста H було використано програмне забезпечення Mathcad. Отримана оцінка показала значення $H \approx 0,75$. Це дозволяє зробити висновок про самоподібність 3D- відеотрафіку.

На підставі вищевикладеного, відзначимо, що в 3D-відеопотоку домінують пакети двох розмірів: великого (більше 50%) і малого (більше 40%) розміру, їх сумарна частка становить понад 95%.

3.2 Дослідження параметрів та проведення порівняльного аналізу трафіку мультимедіа та голографічного трафіку

У рамках дослідження був використаний сегмент мережі, призначений для ГТК телеприсутності, що складався із 3D камери, персонального комп'ютера відправника даних (до якого підключена 3D камера), сервера, персонального комп'ютера одержувача даних із підключеним голографічним обладнанням.

Генерації даних від пристроїв Інтернету речей здійснювалася з використанням програми iperf3. Передача даних здійснювалася в напрямку від ПК відправника до ПК одержувача з передачею даних по протоколу UDP, пропускною здатністю 10 Мбіт/с і розміром буфера для читання/записи даних.

Для генерації даних мультимедіа на ПК відправника здійснювалася відеотрансляція по протоколу UDP з використанням програми VLC Media Player . Прийом відеотрансляції здійснювався на ПК одержувача даних також з використанням програми VLC Media Player .

Камера з підтримкою 3D використовувалася і при відеотрансляції і при генерації голографічного трафіку.

Імітація передачі службового трафіку здійснювалася з використанням команди ping.

При проведенні експерименту здійснювався збір службового трафіку, трафіку мультимедіа, трафіку Інтернету речей (IoT) та трафіку голографічних копій. Для кожного з чотирьох видів перехопленого трафіку проводилося дослідження розподілу проміжків між викликами та довжинами пакетів.

На основі проведеного аналізу розміру пакетів, було встановлено, що довжина пакетів для кожного трафіку може бути описана наступним чином.

1. Службовий трафік генерувався з розміром пакету рівним 74 байти;
2. Трафік мультимедіа (від VLC Media Player) дискретний, що складається з пакетів трьох довжин – 1358 байт з ймовірністю появи 92,87%,

590 байт з ймовірністю появи 6,79% та 60 байт із ймовірністю появи 0,34%;

3. Трафік iperf3, імітуючий навантаження від пристроїв IoT, описується дискретним розподілом довжин пакетів з ймовірностями, поданими у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розподіл довжин пакетів для трафіку, що імітує навантаження від пристроїв IoT

Довжина пакету, байт	288	480	672	870	1074	1278	1482	1686
Ймовірність розподілу, %	6,20	5,17	4,35	3,75	5,32	7,16	9,10	58,95

4. Розподіл довжин пакетів для голографічного трафіку представляє собою суму дискретних розподілів:

– розподіл, при якому довжина пакету дорівнює 1514 байтам, частка даного розподілу щодо сумарного розподілу довжин пакетів голографічного трафіку складає 0,3745;

– триангулярний розподіл з максимальною довжиною пакету і модою рівними 64, 75 і 75 байтам відповідно, частка даного розподілу щодо сумарного розподілу довжин пакетів голографічного трафіку складає 0,6255.

Результати статистичного аналізу емпіричних даних розподілу проміжків між викликами оформлені в вигляді гістограм.

На графіках відображені отримані функції розподілу проміжків між викликами. Зібраний голографічний трафік має середнє значення проміжків між викликами рівними 0,14 мс.

Голографічний трафік може бути описаний безперервним розподілом, репрезентуючим собою суму експоненційного і гамма розподілу з параметрами, представленими в таблиці 3.3.

Функція щільності ймовірності розподілу проміжків між викликами для голографічного трафіку може бути представлена формулою:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2), \quad (3.4)$$

де $f_1(t_1) = e^{-\lambda t}$ ($t > 0$); $f_2(t_2) = \text{gamma}(t_2)$.

Таблиця 3.3 – Значення параметрів розподілу для голографічного трафіку

№	Функція	Значення η_i	Значення параметрів розподілів	
			θ_i	β_i
1	Exponential	0,85	$1,538 \cdot 10^{-4}$	1
2	Gamma	0,15	$2,9 \cdot 10^{-6}$	25

Гістограма розподілу інтервалів між пакетами для голографічного трафіку представлена на рисунку 3.5.

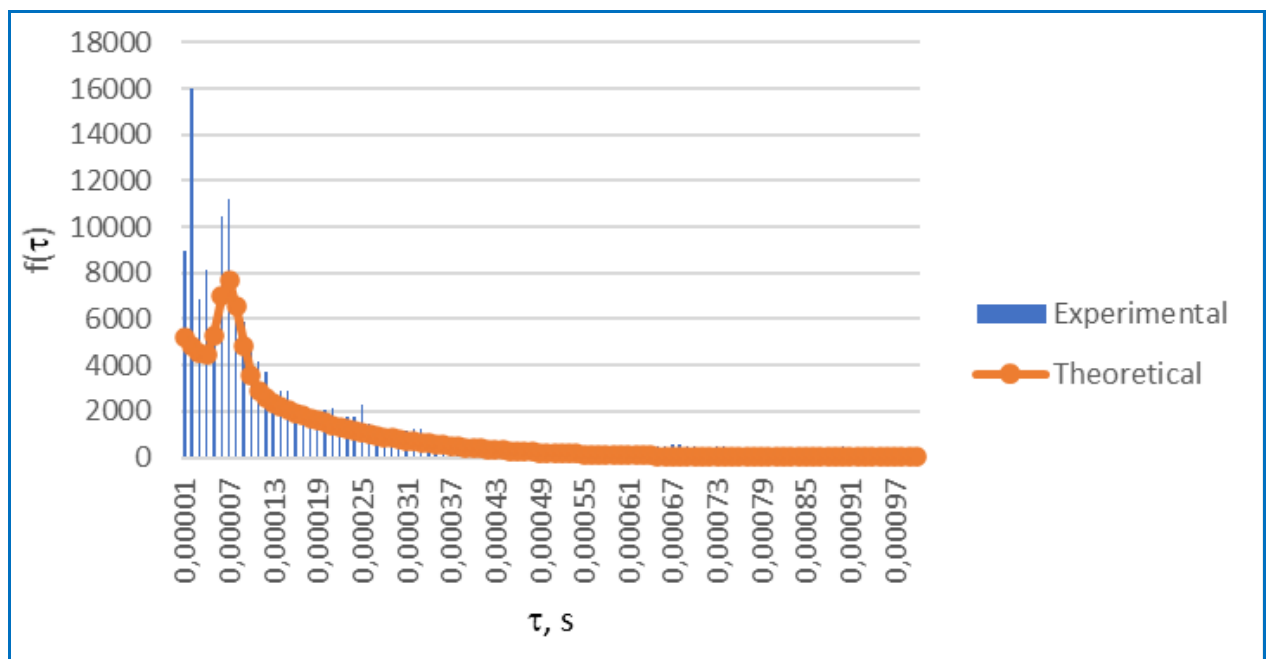


Рисунок 3.5 – Розподіл інтервалів часу між пакетами та їх функція щільності ймовірності для голографічного трафіку

Трафік мультимедіа має середнє значення проміжків між викликами рівним 5,47 мс та може бути описаний безперервним розподілом, що є сумою чотирьох гамма-розподілів з параметрами, поданих в таблиці 3.3.

Функція щільності ймовірності розподілу проміжків між викликами для трафіку мультимедіа може бути представлена формулою:

$$f(t) = \eta_1 f_1(t_1) + \eta_2 f_2(t_2) + \eta_3 f_3(t_3) + \eta_4 f_4(t_4), \quad (3.5)$$

де $f_1(t_1) = e^{-\lambda t}$ ($t > 0$); $f_i(t_i) = \text{gamma}(t_i)$; $i \in \{2, 3, 4\}$.

Таблиця 3.3 – Значення параметрів розподілу для трафіку мультимедіа

№	Функція	Значення η_i	Значення параметрів розподілів	
			θ_i	β_i
1	Gamma	0,85	450	$4,9 * 10^{-8}$
2	Gamma	0,1252	100	$3,6 * 10^{-7}$
3	Gamma	0,01	$2 * 10^7$	$1 * 10^{-8}$
4	Gamma	0,0148	$2 * 10^7$	$1,17 * 10^{-8}$

На рисунку 3.6 відображено гістограму розподілу інтервалів між викликами для трафіку мультимедіа.

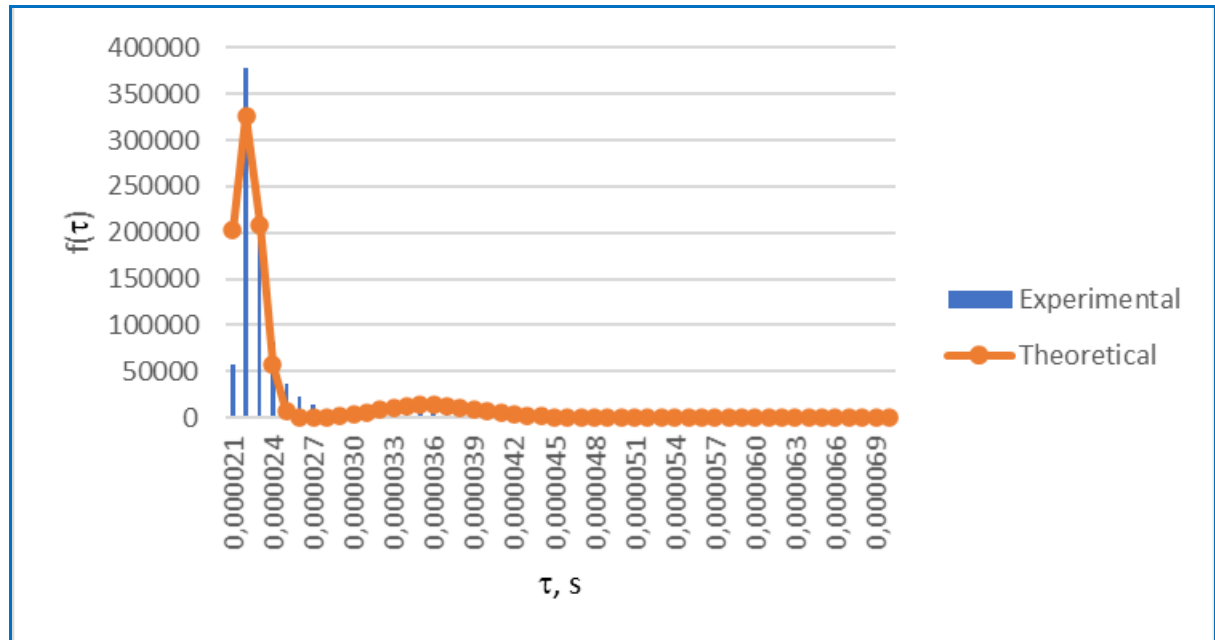


Рисунок 3.6 – Розподіл інтервалів часу між пакетами і їх функція щільності ймовірності для трафіку мультимедіа

Трафік, котрий імітує навантаження від пристроїв Інтернету речей, має середнім значенням проміжків між викликами рівними 1,089 мс . Даний

трафік може бути описаний безперервним розподілом, представляючого собою суму одного розподілу Вейбулу, чотирьох гамма розподілів і одного нормального з параметрами, поданими в таблиці 3.4. Функція щільності ймовірності розподілу проміжків між викликами для трафіку, що імітує навантаження від пристроїв «Інтернету речей», може бути представлена формулою:

$$f(t) = \sum_{i=1}^6 \eta_i f_i(t_i), \quad (3.6)$$

де

$$f_1(t_1) = 1 - \exp\left(-\left(t/\beta\right)^\alpha\right) (t > 0); \quad f_i(t_i) = \text{gamma}(t_i); \quad i \in \{2, 3, 4, 5\}; \quad f_6(t_6) = N(\mu, \sigma).$$

Таблиця 3.4 – Чисельні значення параметрів розподілу для трафіку, що імітує навантаження від пристроїв Інтернету речей

№	Функція	Значення η_i	Значення параметрів розподілів	
			θ_i	β_i
1	Weibull	0,15	4	0,00019
2	Gamma	0,24	250	0,00000138
3	Gamma	0,22	300	0,0000014
4	Gamma	0,14	25	0,0000265
5	Gamma	0,24	1000	0,0000009
6	Normal	0,01	0,071	0,015

На рисунку 3.7 відображена розподіл інтервалів часу між пакетами і їх функція щільності ймовірності для трафіку, що імітує навантаження від пристроїв "Інтернету речей".

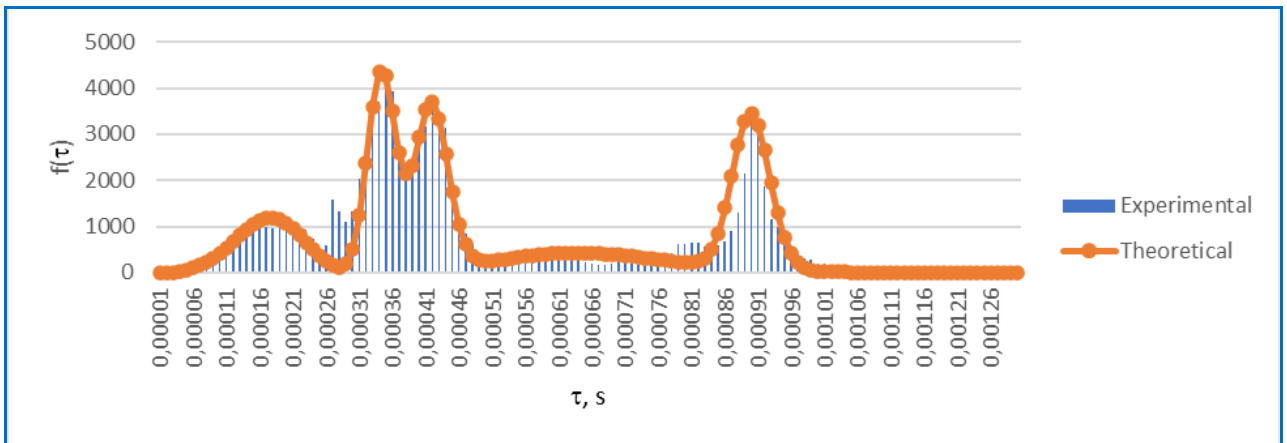


Рисунок 3.7 – Гістограма щільності ймовірності розподілу інтервалів між викликами для трафіку, що імітує навантаження від пристроїв IoT

Службовий трафік (представлений повідомленнями ping) має середнім значенням проміжків між викликами рівними 512,78 мс. Службовий трафік (представлений повідомленнями ping) може бути описаний нормальним розподілом по формулі:

$$f(t) = N(\mu, \sigma), \quad (3.7)$$

де $\sigma = 0,512784$ и $\mu = 0,263251/$

На рисунку 3.8 представлено розподіл інтервалів часу між пакетами та їх функція щільності ймовірності для службового трафіку.

Основні параметри різних видів трафіку, отримані в результаті експерименту представлені у таблиці 3.5.

Актуальна тенденція експонентного збільшення обсягу трафіку і, відповідно, зростання навантаження на мережа, позначає серйозну проблему в сфері забезпечення ресурсів мережі.

Основні висновки з дослідження трафіку 3D-відеопотоку можна сформулювати таким чином.

Розподіл інтервалів часу між пакетами має мультимодальний розподіл і може бути описано змішаним розподілом. Аналіз АКФ і параметра Херста ($H \approx 0,75$) показали виражені властивості самоподібності трафіку.

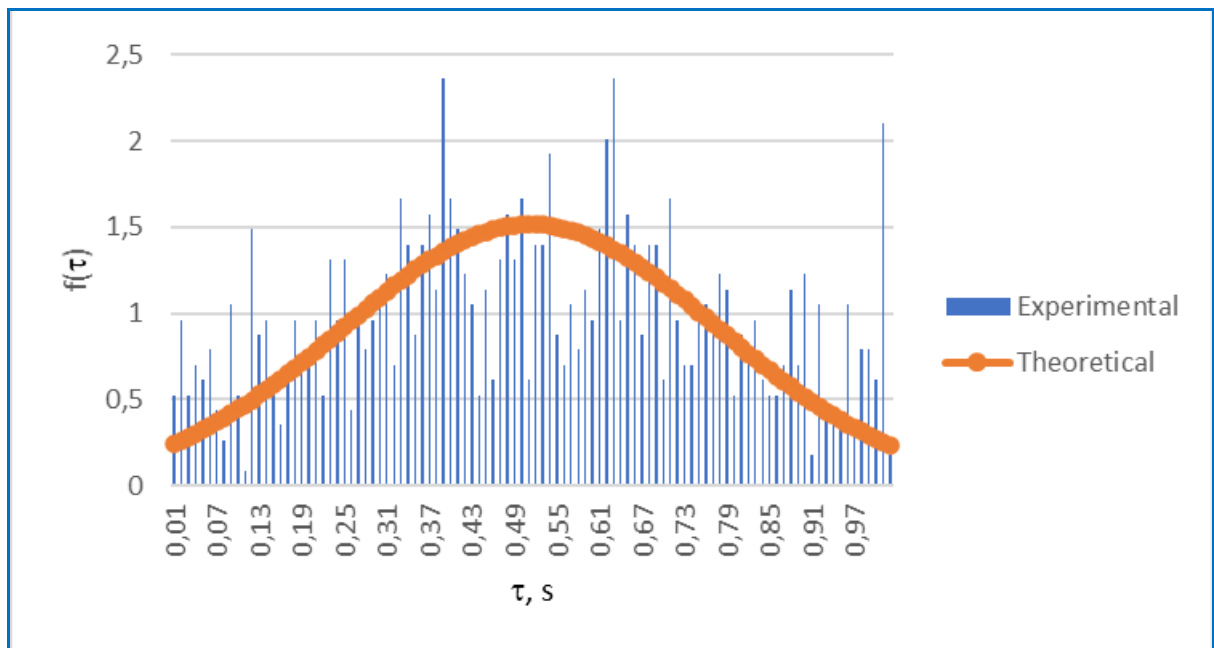


Рисунок 3.8 – Гістограма густини ймовірності розподілу інтервалів між викликами для службового трафіку

Таблиця 3.5 – Основні параметри зібраного трафіку

Вигляд трафіку	Середній розмір пакету даних, байт	Пропускна здатність, пакети/с	Пропускна здатність, Мбіти/с	Пропускна здатність, Кбайти/с	Середнє значення проміжків між викликами, с
Службовий	74	1,95	0,017848	2,231	0,512784
Мульти-медіа	1301	182,9	1,904	238	0,005466
Інтернет Речей	1392	918,13	10,23	1278,186	0,001089
Гологра-фічні копії	986	6929,9	54	6831	0,000148

Отримані характеристики трафіку дозволяють судити про нього як про випадковому процесі, а також отримати чисельні оцінки основних його параметрів. Набір даних достатній для вибору моделей і розрахунку основних параметрів обслуговування трафіку.

Висока пропускна здатність, низька затримка, надійність з'єднання і стандартизація мереж зв'язку є необхідними умовами для успішної реалізації голографічної комунікації.

Наведені вище результати можуть бути використані для моделювання обслуговування 3D-відеотрафіку в мережі зв'язку. Результати дослідження розподілу інтервалів між пакетами і довжин пакетів надають можливість

використання наближених моделей з теорії масового обслуговування для опису часових параметрів функціонування мережі зв'язку.

Також результатом дослідження стала розроблена аналітична модель трафіку 3D-відеопотоку, отримана на основі даних експерименту і результатів статистичної обробки, яка може бути використана при рішенні завдань дослідження трафіку, а також планування нових мереж та послуг зв'язку з урахуванням вимог до якості обслуговування.

Перспективним напрямом дослідження може стати більше різностороннє вивчення голографічного трафіку і проблем передачі голографічних копій.

3.3 Основні етапи методу обслуговування голографічного трафіка

В процесі обслуговування голографічного трафіка зазвичай виділяють такі основні етапи.

Етап 1. Ідентифікація трафіка.

На цьому етапі визначається тип даних як голографічний (на основі метаданих або аналізу заголовків пакетів), при агрегації з іншими видами трафіку необхідна пріоритезація голографічного трафіка в чергах маршрутизаторів або комутаторів.

Етап 2. Класифікація та маркування.

Відбувається класифікація трафіка за параметрами QoS (якості обслуговування): надкритичний, реального часу або допоміжний. Призначаються мітки або теги (наприклад, DSCP, MPLS) для обробки на рівні мережі.

Етап 3. Маршрутизація з урахуванням QoS.

На цьому етапі обирається оптимальний маршрут для голографічного трафіка з урахуванням затримок, пропускної здатності та завантаження каналів. Також можлива динамічна зміна маршрутів у разі виявлення заторів або деградації якості з'єднання.

Етап 4. Буферизація та згладжування потоку.

Використовується адаптивна буферизація для згладжування коливань у швидкості передавання та застосовуються алгоритми компенсації втрат або варіацій затримки (jitter buffer).

Етап 5. Мережеве резервування ресурсів.

На цьому етапі виділяються мережеві ресурси (смуги пропускання, обчислювальної потужності) для гарантії якості та підтримуються протоколи типу RSVP або Segment Routing для резервування.

Етап 6. Адаптація якості передачі.

На цьому етапі відбувається динамічне регулювання просторової/часової роздільності або частоти кадрів залежно від умов мережі. Для цього використовуються кодеки з підтримкою scalable video coding (SVC) або 6DoF (шестиступінчаста свобода).

Етап 7. Моніторинг та зворотний зв'язок.

Проводиться неперервний моніторинг параметрів доставки (затримка, втрата, смуга). Здійснюється зворотний зв'язок між вузлами для адаптації параметрів передачі в реальному часі.

Етап 8. Обробка на рівні периферійних обчислень (edge computing).

На цьому етапі використовуються граничні обчислення на краю мережі для попередньої обробки голографічного потоку, зменшення трафіка та затримки. Проводяться кешування і рендеринг окремих компонентів ближче до користувача.

Наведений метод забезпечує узгоджену, надійну і масштабовану доставку голографічного контенту в умовах обмежених мережевих ресурсів. При агрегованому трафіку на 3 та 5 етапах обслуговування голографічного трафіка використовується короткочасний прогноз складових з використанням наведених у другому розділі законів розподілу для конкретних типів трафіку, агрегованих разом з голографічним.

3.4 Дослідження агрегованого потоку з голографічним трафіком

Перспективи появи нових видів послуг при надалі розвитку інформаційно-комунікаційних технологій все більше чітко позначаються. Рішення проблеми організації обслуговування голографічного трафіку поступово переходить в практичну область і набуває значення пріоритетного напрямку.

Мета такого дослідження - розробити модель обслуговування голографічного трафіку, що дозволяє оцінити затримку при проходженні пакету в мережі зв'язку.

Час обслуговування, описується з допомогою аналітичних виразів, отриманих на основі апроксимації результатів експерименту та наведених у попередньому підрозділі..

Для реалізації поставленої мети визначено такі завдання:

- підібрати відповідні аналітичні вирази, які можуть бути використані для побудови моделі;
- побудувати модель для первісної оцінки характеристик мережі;
- провести імітаційне моделювання обслуговування голографічного трафіку зі змішаним розподілом при різному кількості джерел;
- проаналізувати відомі способи апроксимації результатів імітаційного моделювання;
- провести аналіз остаточних показників, отриманих в результаті імітаційного моделювання.

Методи імітаційного моделювання, як універсальні методи дослідження кількісної оцінки властивостей функціонування мереж, дозволяють реалізувати вивчення властивостей агрегованого трафіку.

Аналітична модель, в свою чергу, дозволяє сформулювати відповідні аналітичні вирази, які дають можливість розрахувати параметри та характеристики системи масового обслуговування.

Точність аналітичної моделі оцінюється шляхом порівняння результатів аналітичного та імітаційного моделювання.

Зіставлення двох функцій дозволить виявити відповідність аналітичної моделі даними, отриманим в результаті імітаційного моделювання. Виходячи зі статистичних показників, також обчислити відсоток помилки.

На першому етапі дослідження був проведений експеримент. Його результати лягли в основу розробки моделі в програмному комплексі Anylogic.

На рисунку 3.9 представлена розроблена імітаційна модель в програмному комплексі Anylogic.

У моделі Ноло {i} – джерела, отримані в результаті проведеного натурального експерименту; у елементі Switch вказано пропускну здатність для каналу в 1 гбіт/с, а також збираються дані по сумарному трафіку, що проходить через комутатор в одиницю часу; *Delaytransfer* – затримка передачі,

$$Delaytransfer = V / Cap, \quad (3.8)$$

де *Cap* – пропускну здатність мережі, *V*–обсяг збираємих даних

$$V = u * T, \quad (3.9)$$

де *u* – середній обсяг генеруємих даних в секунду (Мбіт/с), *T* – період збору даних; *Delaydistribution* – задержка распространения:

$$Delaydistribution = d / (k \cdot c), \quad (3.10)$$

де *k* – коефіцієнт поширення, *c* – швидкість світла, *d* – відстань між вузлами або між останнім вузлом та користувачем; *TS* та *TE* – використовуються для отримання часу обробки в системі.

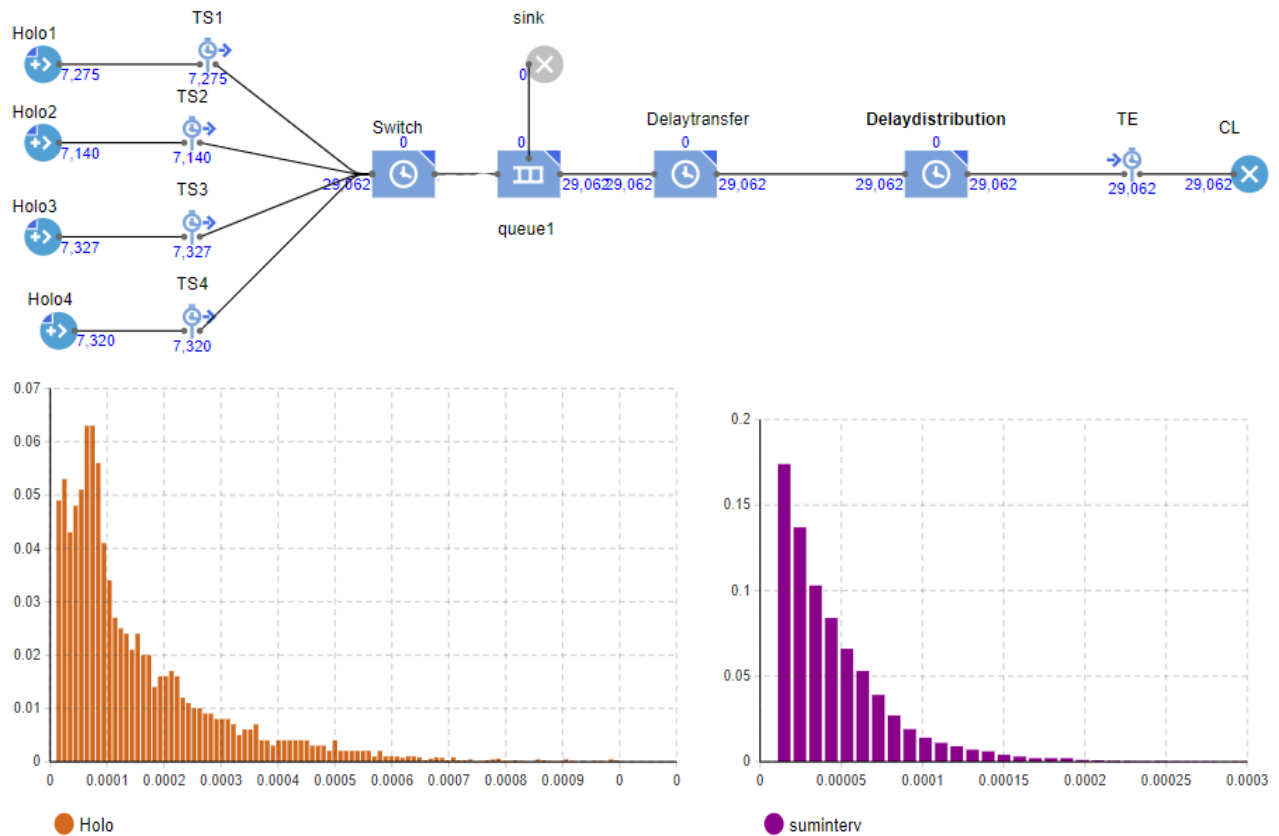


Рисунок 3.9 – Розроблена модель у програмному комплексі AnyLogic

Результати проведеного імітаційного моделювання дозволили висунути гіпотезу про тому, що агрегований потік, що складається з деякої кількості потоків голографічного трафіку та набуває вигляду найпростішого.

Аналізуючи гістограму агрегації потоків голографічного трафіку, можна висунути припущення, що отриманий потік набуває властивість найпростішого потоку. Для обґрунтування даного припущення була використана теорема Пальма-Хінчина про збіжність потоків в найпростіший потік. Теорема дозволяє оцінити ступінь збіжності між реальним потоком і його апроксимацією найпростішим потоком для аналізу і прогнозування роботи системи.

На підставі критерію Пірсона (хі-квадрат) були сформульовані наступні гіпотези:

– нульова гіпотеза – розглянуті у моделі часові інтервали розподілені експоненційно;

– альтернативна гіпотеза - розглянуті у моделі часові інтервали не розподілені експоненційно.

Потім була побудована гістограма спостерігаємих розподілів. Наступним кроком стало оцінювання параметра коефіцієнт варіації на основі спостерігаються даних. Надалі, було зроблено обчислення статистики хі-квадрат. Для обчислення була використана формула

$$\chi_{\text{емпіричне}}^2 = \sum_{k=0}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (3.11)$$

де O_i – спостережуваний розподіл, E_i – очікуваний розподіл.

Критична область для заданого рівня значимості була визначена з використанням розподілу хі-квадрат з $k-1$ ступенями свободи (де k - число інтервалів). Підставив висновку, що підтверджує нашу гіпотезу, будуть такі:

- якщо значення статистики хі-квадрат потрапляє у критичну область, то нульова гіпотеза відкидається на користь альтернативної;
- в іншому випадку нульова гіпотеза не відкидається.

Наступним етапом дослідження стало моделювання агрегації потоків від різноманітних джерел.

Спочатку було використано три джерела.

Представлені статистичні характеристики потоку, сформованого з трьох джерел с $k = 30$ в таблиці 3.6, відображені середні значення, коефіцієнт варіації, λ та середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 3.6 – Статистичні характеристики потоку моделі 3-х джерел

Значення	У цифровому виразі
середня	0,0000487
середньоквадратичне відхилення Δ	0,0000478
коефіцієнт варіації	0,98
λ	20550,76

Щільність розподілу агрегованого трафіку вказано на рисунку 3.10.

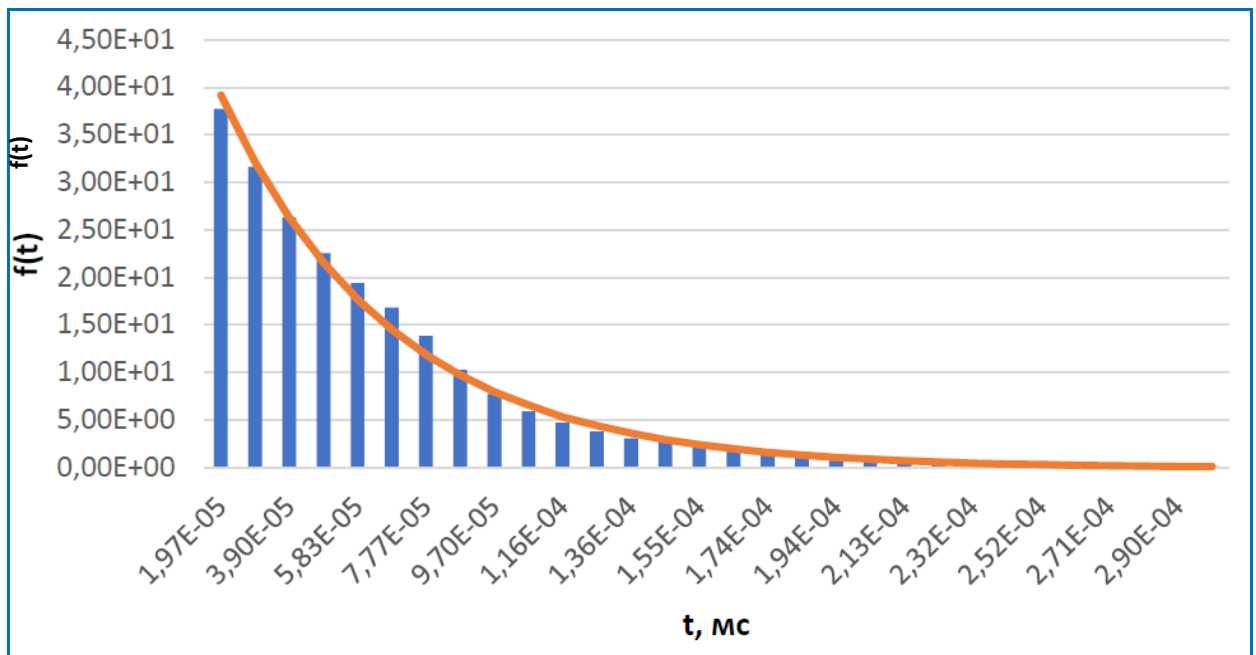


Рисунок 3.10 – Щільність розподілу агрегованого трафіку 3 джерел

Отриманий результат вважаємо негативним.

На наступному етапі дослідження до моделі було додано ще одне джерело.

Результат відображено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Статистичні характеристики потоку моделі 4-х джерел

Значення	У цифровому виразі
середня	0,00003645
середньоквадратичне відхилення Δ	0,00003578
коефіцієнт варіації	0,98
λ	27434,84

Розподіл інтервалів часу агрегованого трафіку та їх функція щільності ймовірності на рисунку 3.11.

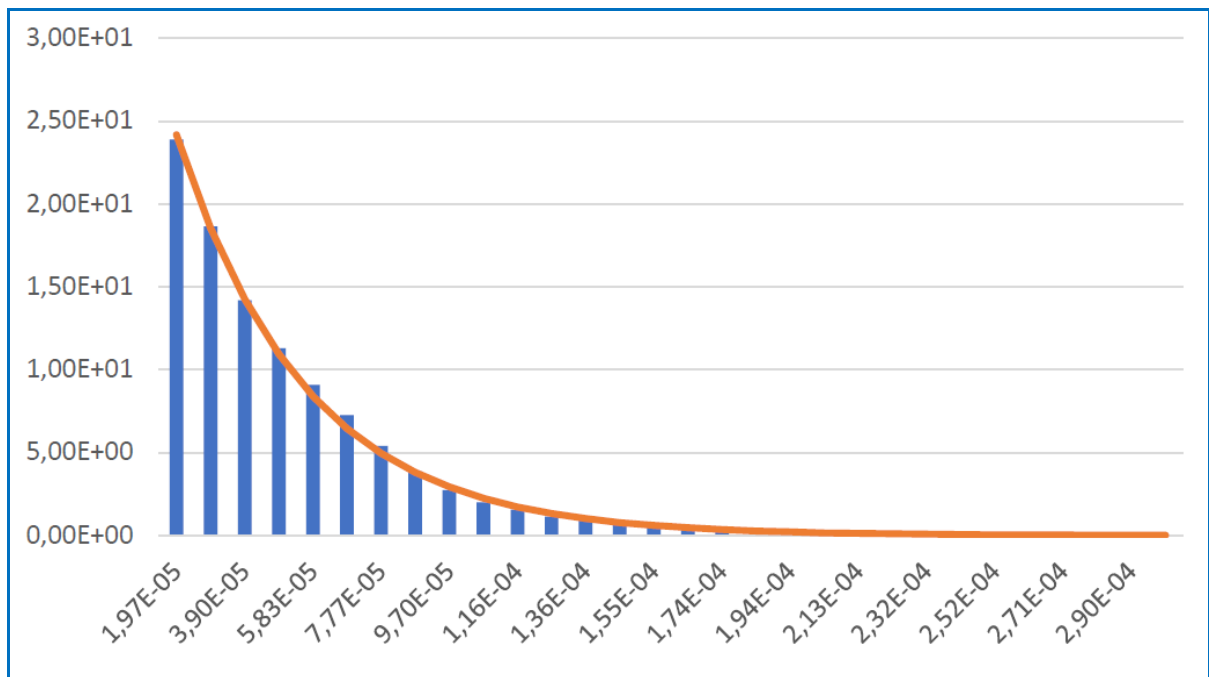


Рисунок 3.11 — Щільність розподілу агрегованого трафіку 4 джерел

Аналіз отриманих статистичних даних дозволив прийти до висновку, що дана кількість потоків не сходиться до найпростішого потоку, оскільки

$$\chi_{\text{емпіричне}}^2 = 112,5 > 39,1 = \chi_{\text{критичне}}^2. \quad (3.12)$$

Альтернативна гіпотеза виконується, тобто розглянуті часові інтервали не розподілені експонентно.

Тоді в моделі використовуємо 11 джерел, при $k=30$. Статистичні характеристики потоку моделі, представлені в таблиці 3.8, а на рисунку 3.12 відображена щільність розподілу агрегованого трафіку від 11 джерел.

Таблиця 3.3 – Статистичні характеристики потоку моделі 11 джерел

Значення	У цифровому виразі
середня	0,00001328
середньоквадратичне відхилення Δ	0,00001312
коефіцієнт варіації	0,98
λ	75301,21

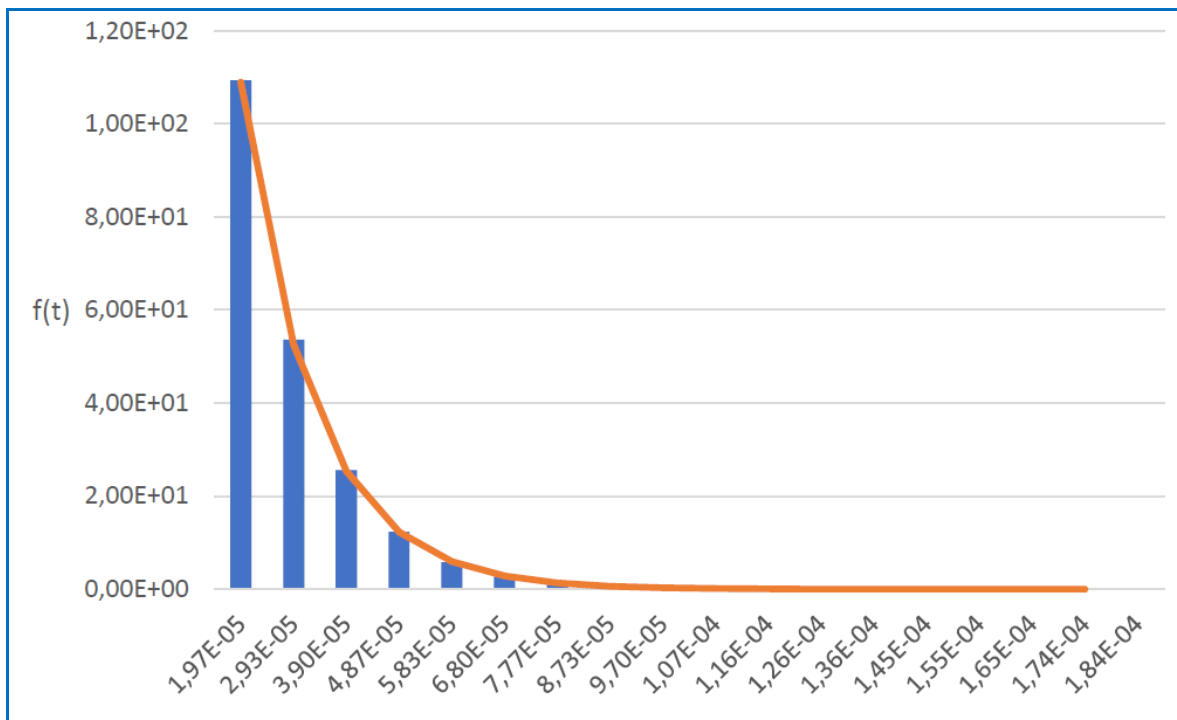


Рисунок 3.12 – Щільність розподілу агрегованого трафіку 11 джерел

Оскільки, виконана умова

$$\chi_{\text{емпіричне}}^2 = 39,3 > 39,1 = \chi_{\text{критичне}}^2, \quad (3.13)$$

то, як і у попередніх експериментах, альтернативна гіпотеза виконується.

Важливо відзначити, що одинадцять джерел є критичною точкою (границею). На наступному етапі моделювання використовуємо 12 джерел з $k=30$. Результати відображені у таблиці 3.9. На рисунку 3.13 відображено щільність розподілу агрегованого трафіку 12 джерел.

Таблиця 3.9 – Статистичні характеристики потоку моделі 12 джерел

Значення	У цифровому виразі
середня	0,00001217
середньоквадратичне відхилення Δ	0,00001204
коефіцієнт варіації	0,99
λ	82169,26

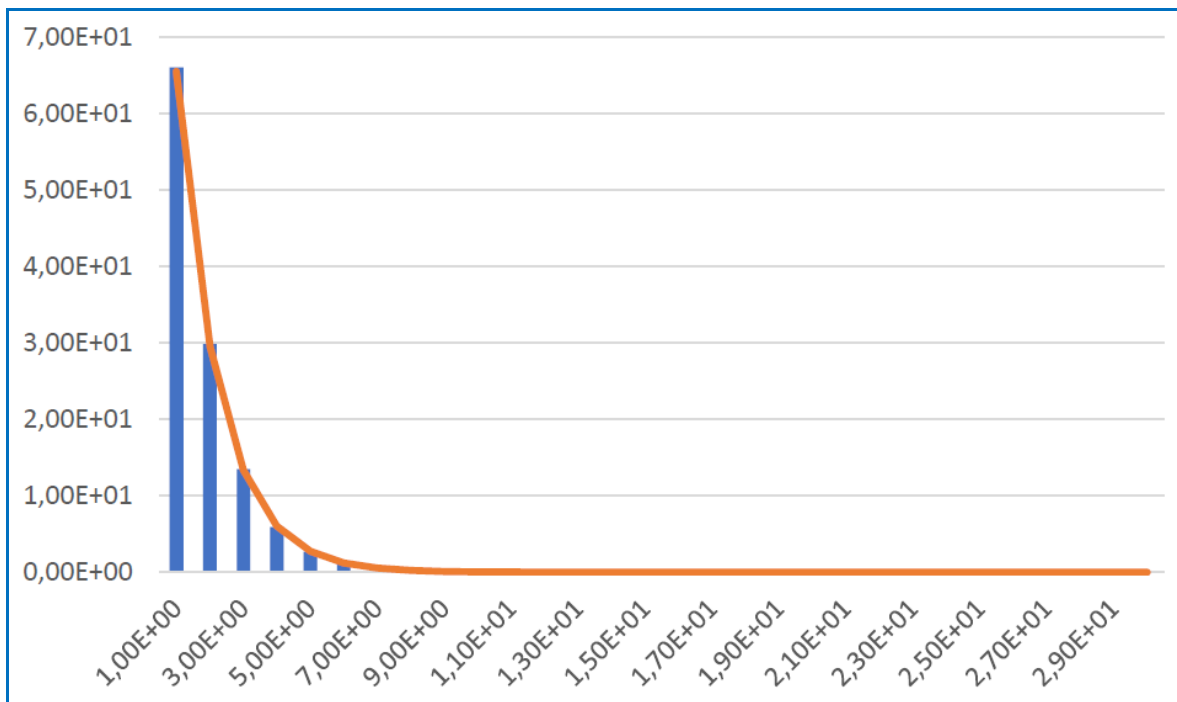


Рисунок 3.13 – Щільність розподілу агрегованого трафіку 12 джерел

У результаті проведеного порівняння показників, маємо, що

$$\chi_{\text{емпіричне}}^2 = 23,6 < 39,1 = \chi_{\text{критичне}}^2. \quad (3.14)$$

Отже немає підстав відкидати нульову гіпотезу, що підтверджує, що агрегований потік набуває властивості найпростішого.

Для підтвердження отриманої тенденції, перевіряємо на моделі з 20 джерелами при $k=30$. Статистичні характеристики потоку моделі відображені у таблиці 3.10. Щільність розподілу агрегованого трафіку від 20 джерел представлена на рисунку 3.14.

Таблиця 3.10 – Статистичні характеристики потоку моделі від 20 джерел

Значення	У цифровому виразі
середня	0,00000730
середньоквадратичне відхилення Δ	0,00000726
коефіцієнт варіації	0,99
λ	136967,53

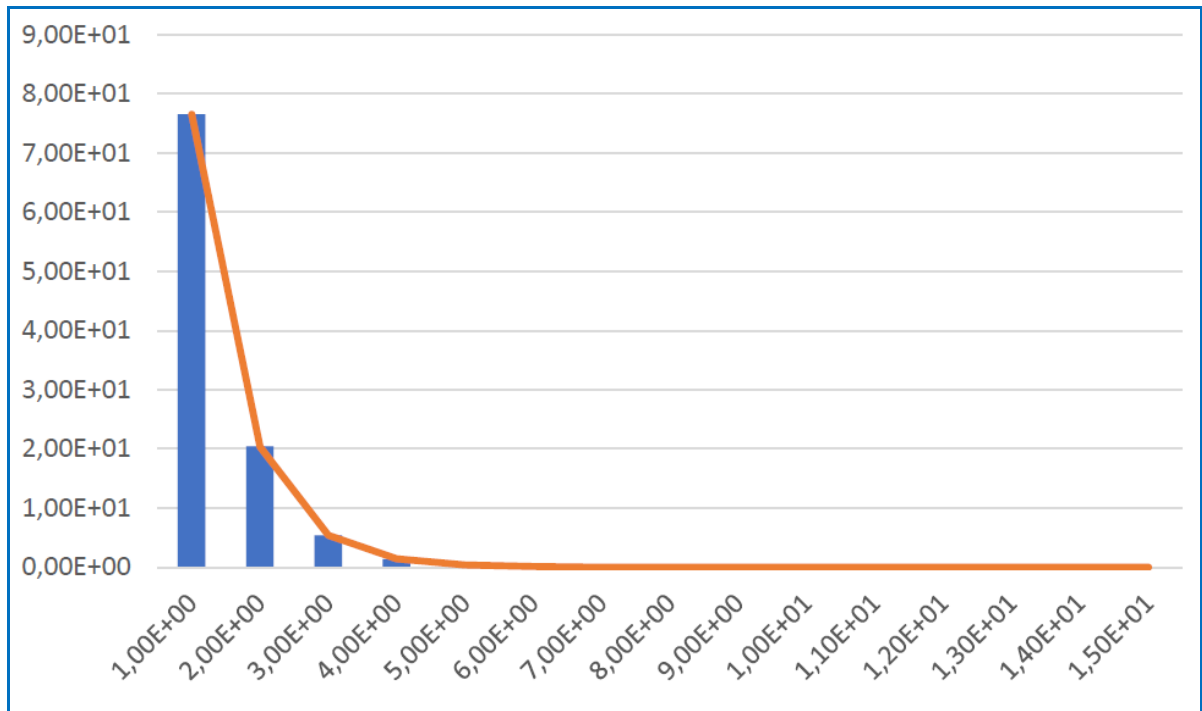


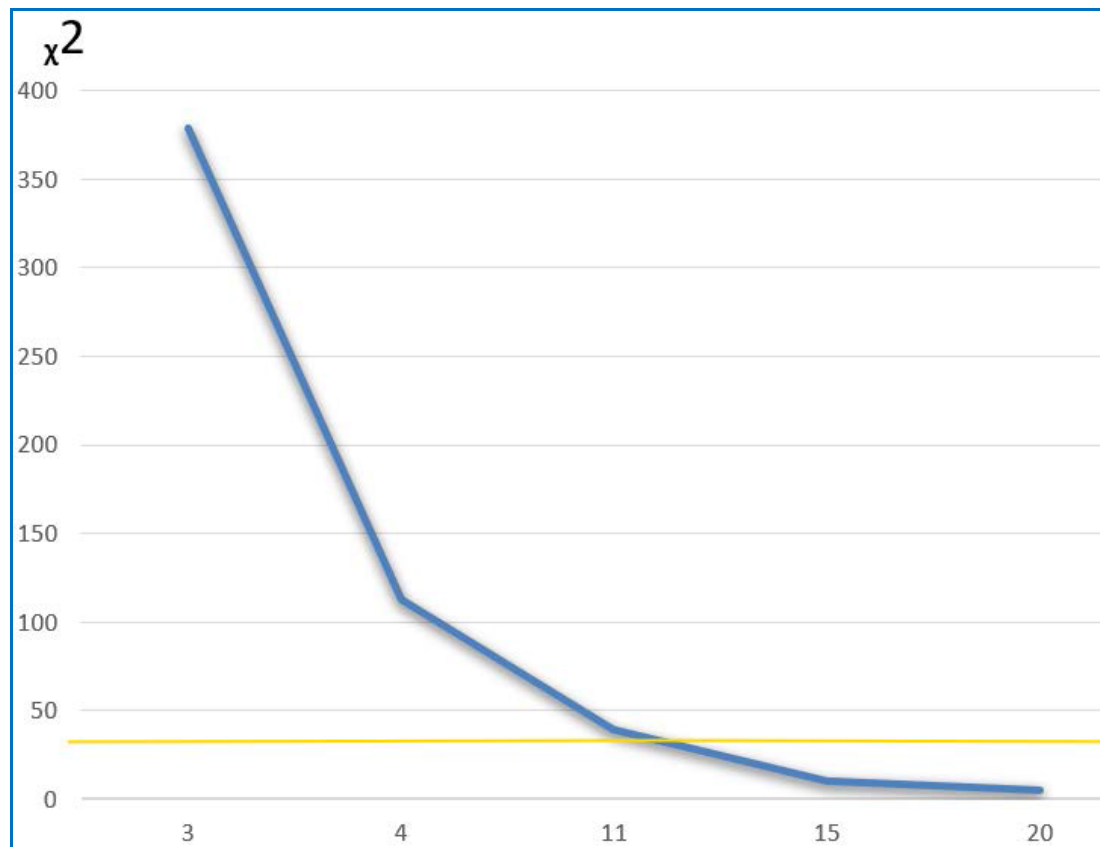
Рисунок 3.14 – Щільність розподілу агрегованого трафіку 20 джерел

Оскільки у даному випадку

$$\chi_{\text{емпіричне}}^2 = 5,2 < 39,1 = \chi_{\text{критичне}}^2, \quad (3.15)$$

то немає підстав відкидати нульову гіпотезу та можна прийти до висновку, що голографічний трафік за великої кількості користувачів має властивість найпростішого потоку.

Залежність отриманих даних критерію хі-квадрат кількості джерел показана на рисунку 3.15.



Кількість агрегованих джерел

Рисунок 3.15 – Залежність отриманих даних критерію хі-квадрат від кількості джерел (жовта лінія – границя)

Для оцінювання затримки в розробленій моделі, застосовуємо формулу Поллячека -Хінчика. Ця формула застосовується для розрахунку характеристик системи масового обслуговування M/G/1, де запити, що надходять, мають довільний розподіл часу обслуговування.

У разі системи M/G/1 середній час обслуговування (позначається $W_{average}$) та загальний час обслуговування системи розраховуються таким чином:

$$W_{average} = \frac{\rho \cdot t_{average}}{2 \cdot (1 - \rho)} \cdot \left(1 + \frac{t_{average}}{\sigma_t} \right)^2, \quad (3.16)$$

де ρ – навантаження, $t_{average}$ – середній час очікування в черзі, σ_t – середньоквадратичне відхилення часу очікування в черзі;

$$W = W_{average} + Delaytransfer + Delaydistribution. \quad (3.17)$$

Різниця між даними аналітичної і імітаційною моделі, підтверджуюча відсоток помилки, не перевищує 10%.

На рисунку 3.16 представлено графічне зображення порівняння даних отриманих від аналітичної та імітаційною моделі.

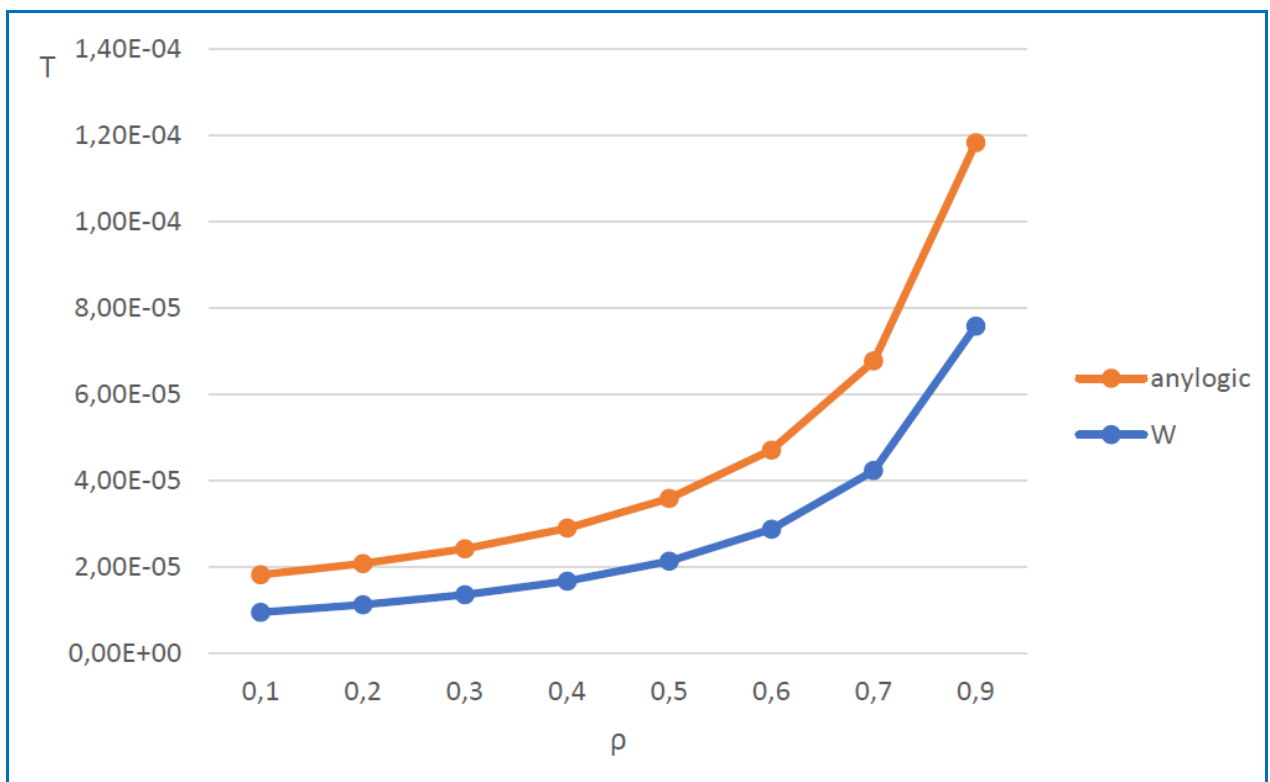


Рисунок 3.16 – Порівняння даних, отриманих від аналітичної та імітаційної моделей

Порівняння двох кривих дозволяє оцінити точність аналітичної моделі і її відповідність реальним даними, отриманим при імітаційному моделювання.

Графік дає уявлення про тому, як час очікування змінюється в залежності від завантаженості системи.

3.5 Процес передачі змішаного трафіку

Розміщення обчислювальних серверів (віртуальних серверів) ближче до границі мережі радіодоступу дозволяє зменшити затримку поширення пакетів даних. Тому час на передачу даних до обчислювального сервера на границі мережі радіодоступу при збереженні зібраних даних і при здійсненні передачі даних граничного обчислювального хмари до кінцевого користувача буде мати меншу затримкою передачі даних, у порівнянні з аналогічними процесами для головної хмари.

Однак ресурси обчислювальних серверів на границі мережі радіодоступу значно менше, чим у головної хмари (віддаленого центру обробки даних, ЦОД). Тому необхідно визначити критерії вибору обчислювальної хмари для зберігання даних.

Основні критерії для вибору обчислювального хмари для зберігання даних наведені нижче:

- ресурси зберігання даних: обчислювальний сервер повинен мати можливість зберегти дані від одного пристрої за певний період часу;
- пропускна здатність обчислювального сервера, даний параметр має особливе значення при передачу зібраних даних;
- затримка передачі даних від обчислювального сервера для кінцевого користувача.

Обчислювальні хмари граничних серверів можуть бути організовані на платах одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi з модулями Wi-Fi 802.11n і ресурсами зберігання за замовчуванням до 32 ГБ. У якості Мікросерверів і Мінісерверів можуть розглядатися сервера фірми Adlink MECS-6120 і MECS-7211 відповідно. Дані сервера можуть мати до 4 оптичних модулів 10Гбіт/с і максимальними ресурсами зберігання від 2 до 8 Тбайт.

У таблиці 3.11 представлено час періоду зберігання даних від одного пристрої, яке можуть зберігати обчислювальні хмари для трафіку мультимедіа та голографічного трафіку.

Таблиця 3.6 – Максимальний час періоду зберігання даних від одного пристрою

Трафік		Максимальний термін зберігання, годинник		
Тип	Необхідна мінімальна пропускна здатність.	Rasbery PI, 32 GB	Мікросервер, 2TB	Мінісервер, 8TB
Мультимедіа	1,9	4,79	306,6	1226,41
Голографічний	54	0,17	10,79	43,15

Вибір сервера для наступного зберігання пропонується здійснювати з використанням мережевого оркестратора, який може бути розміщено на головному сервері.

Мережевий оркестратор також буде відповідальний за визначення навантаження генерується для зберігання трафіку.

На даному етапі дослідження розглядався випадок, коли зберігання даних від одного пристрої за обраний період часу здійснювалося на одному обчислювальному хмарі.

Було запропоновано здійснювати зберігання даних на сервері з мінімальної середньої затримкою передачі даних до кінцевого користувача. При цьому необхідно враховувати, має чи сервер достатніми обчислювальними ресурсами для зберігання даних одного пристрої за заданий проміжок часу (для виконання даної завдання необхідно для кожного пристрої збору даних визначити обсяги трафіку, генеровані за даний проміжок часу). Затримка передачі даних у даної роботі розглядалася як сума затримки поширення і обробки даних (залежною від пропускної можливості обчислювальної хмари).

У програмному комплексі Anylogic була створено модель передачі збирається трафіку на одне з чотирьох обчислювальних серверів: мікро-сервер, граничний сервер, міні сервер, головний сервер.

На рисунку 3.17 відображена структура імітаційної моделі.

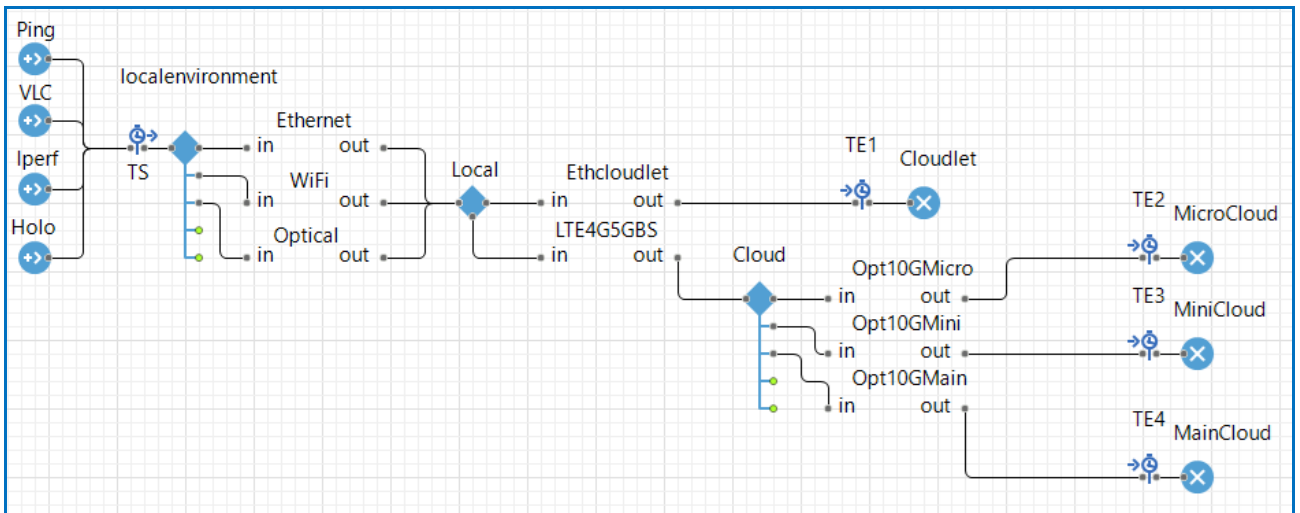


Рисунок 3.17 – Імітаційна модель у програмному комплексі Anylogic

У якості інтервалів між викликами для кожного трафіку використовувалися раніше підібрані розподілу.

Передача даних відбувалася в локальному середовищі по Ethernet, оптичний кабель, Wi-Fi, від роутера 5G до граничного сервера і від базової станції до мікросервера здійснювалася на відстань 50 метрів, з пропускною здатністю 100, 150, 1000 Мбіт/с відповідно.

Передача даних до Cloudlet здійснювалася з пропускною здатністю 1 Гбіт/с.

Передача даних до базової станції здійснювалася з пропускною здатністю 1,55 Гбіт/с на відстань 1.2 км (у відповідно з результатами твіста, проведеного компаніями NTT DoCoMo і Huawei).

Відстань від Базовий станції було обрано 50м, 4 км, 45 км відповідно.

У таблиці 3.12 представлені значення середньої затримки передачі даних до обчислювальних хмар для кожного типу трафіку.

В результаті дослідження підтверджена висунута гіпотеза про те, що при агрегації великої кількості потоків голографічного трафіку сформований потік набуває властивості найпростішого потоку.

Дослідження дозволяє отримати оперативну оцінку продуктивності системи при різних рівнях навантаження і виявити критичні точки, які вимагають додаткової оптимізації або масштабування.

Таблиця 3.12 – Значення середньої затримки передачі даних до обчислювальних хмар для кожного типу трафіку

Тип трафіку	Затримка			
	Граничний сервер	Мікро-сервер	Міні сервер	Головний сервер
Службовий	$1,43 * 10^{-5}$	$2,44 * 10^{-5}$	$3,78 * 10^{-5}$	$2,30 * 10^{-4}$
Мультимедіа	$3,64 * 10^{-4}$	$3,57 * 10^{-4}$	$3,83 * 10^{-4}$	$5,77 * 10^{-4}$
Інтернет Речей	$8,58 * 10^{-5}$	$8,70 * 10^{-5}$	$1,06 * 10^{-4}$	$3,03 * 10^{-4}$
Голографічний	$6,38 * 10^{-5}$	$6,58 * 10^{-5}$	$8,47 * 10^{-5}$	$2,83 * 10^{-4}$
Змішаний	$7,33 * 10^{-5}$	$7,49 * 10^{-5}$	$9,37 * 10^{-6}$	$2,93 * 10^{-4}$

Розрахована аналітична модель по формулі Поллячека-Хінчина для розрахунку характеристики системи масового обслуговування. В процесі проведення дослідження був отриманий графік порівняння розрахунків аналітичної і імітаційної моделі, який вказує, що помилка не перевищує десяти відсотків.

Отримані результати дослідження мають практичну значимість, так як можуть бути використані для рішення завдань дослідження голографічного трафіку, прогнозування розвитку інноваційних видів послуг зв'язку з урахуванням вимог до якості обслуговування.

Проведене дослідження дозволяє визначити основні напрямки для подальшого вивчення всіх аспектів голографічного типу комунікації.

У ході роботи була вивчена реалізація трафіку в течії часу спостереження.

Дані, отримані в результаті проведеного експериментального дослідження, дозволили визначити оптимальний вибір сервера зберігання даних.

Резюмуючи, відзначимо наступне. На даному етапі розвитку мереж зв'язку стикаємося з феноменальним зростанням трафіку відеопотоку, у зв'язку з чим важливо розуміти його характеристики і властивості, як для

ефективного використання мережевих ресурсів, так і для прогнозування їх розвитку.

Екстраполюючи становище про збільшенні обсягу трафіку відеопотоку (у відповідності з даними статистики) на процеси формування і розвитку трафіку голографічного відеопотоку, можна зробити припущення про потенційне збільшення обсягу даного виду трафіку і необхідності його дослідження.

Перспективним напрямом досліджень, на наш погляд, може бути подальше вивчення голографічного трафіку і робота над створенням моделей відповідних моделей масового обслуговування.

ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у кваліфікаційній роботі результатів дозволило вирішити актуальне науково-технічне завдання, спрямоване на підвищення якості передачі голографічної інформації.

В результаті проведених досліджень отримані такі наукові та практичні результати.

1. Проведений аналіз голографічних послуг та голографічного типу комунікацій, а також напрямів розвитку мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь для надання даних послуг. В ході аналізу встановлено, що зростання трафіку, виробленого голографічними послугами, суттєво збільшується. Позначено основні особливості, які властиві голографічному типу комунікації та голографічному аватарові.

2. Проведені дослідження характерних особливостей поведінки голографічного трафіка. Визначені вимоги до інноваційних технологій запису голографічних копій, методів стиснення даних для забезпечення голографічного зв'язку, передачі голографічних копій кінцевому користувачеві з високою якістю відтворення.

3. Проведені дослідження процесів обслуговування різних варіантів формування трафіку 3D. Зокрема, досліджені особливості трафіку мультимедіа і голографічних послуг, а також послуг Інтернету речей, розроблені моделі трафіку, визначено що трафік даних послуг представляє собою суміш різних розподілів, а також, що трафік голографічних послуг має властивість самоподібності.

4. Розроблені та досліджені модель та метод процесу обслуговування голографічного трафіку в мережах спільного користування. Побудовано модельну мережа для дослідження трафіку 3D відеопотоку з використанням технології DWDM, Wi-Fi, Ethernet Удосконалений метод обслуговування трафіку голографічного типу комунікацій у мережах п'ятого

та наступних поколінь при спільному використанні каналів зв'язку за рахунок визначення розподілів складових агрегованого трафіку, який має однією із складових голографічну інформацію, що сприяло підвищенню якості її передачі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kuchuk N., Udyansky R., Usichenko V., Buslov P., Huk A. Traffic providing holographic type of communications. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025. Вип. 1(79). С. 188–193.
2. Cernigliaro G. et al. Extended Reality Multipoint Control Unit—XR-MCU Enabling Multi-user Holo-conferencing via Distributed Processing //International Broadcasting Convention IBC. – 2020. – P. 1-9.
3. Li N., Lefevre D. Holographic teaching presence: participant experiences of interactive synchronous seminars delivered via holographic videoconferencing //Research in learning technology. – 2020. – Т. 28.
4. Themelis C., Sime J. A. From video-conferencing to holoportation and haptics: How emerging technologies can enhance presence in online education? //Emerging technologies and pedagogies in the curriculum. – 2020. – С. 261-276.
5. Aman A. M., Shiratuddin N. Holographic Video Conferencing for Fostering Communication and Participation: Pre-Conceptualization of Focus Group of Female Learners in Arab Open University (KSA) //International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Т. 7. – №. 4.29. – С. 157-162.
6. Montagud M. et al. Social VR and multi-party holographic communications: Opportunities, Challenges and Impact in the Education and Training Sectors //arXiv preprint arXiv:2210.00330. – 2022.
7. Hjeij, Mohamad, Mario Montagud and David Rincón. “Multiuser Virtual Experiences powered by Holoportation Technologies and Multimodal Human-Computer Interaction (HCI).” Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference (2024): n. pag
8. Fernández S. et al. Addressing Scalability for Real-time Multiuser Holoportation: Introducing and Assessing a Multipoint Control Unit (MCU) for

Volumetric Video //Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. – 2023. – С. 9243-9251.

9. L. Luevano, E. Lopez de Lara, and H. Quintero, ‘Professor Avatar Holographic Telepresence Model’, Holographic Materials and Applications. IntechOpen, Sep. 25, 2019. doi: 10.5772/intechopen.85528

10. Ishii, H., Kobayashi, M., Grudin, J.: Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments. ACM Transactions on Information Systems, 1993. Vol. 11(4): 349-375.

11. Siemonsma S., Bell T. Holokinect: Holographic 3D video conferencing //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 21. – С. 8118.

12. Olifer V. Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design / V. Olifer, N. Olifer. – John Wiley & Sons, 2023. – 996 p.

13. Stallings W. Data and Computer Communications / W. Stallings. – Pearson Education, 2021. – 1023 p.

14. Google I/O 2021 [Электронный ресурс] // Google I/O : [сайт]. – 2021. – URL : <https://io.google/2021/?lng=en>

15. Integrated Systems Europe (ISE) 2023 [Электронный ресурс] // Integrated Systems Europe : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.iseurope.org/welcome>

16. CES 2024 [Электронный ресурс] // CES : [сайт]. – 2021. – URL : <https://www.ces.tech/discover/?type=Article&q=Holo>

17. Banitalebi-Dehkordi, A., Pourazad, M.T. & Nasiopoulos, P. An efficient human visual system based quality metric for 3D video. Multimed Tools Appl 75, 4187–4215 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2466-z>.