



ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

<https://doi.org/10.23939/ict2023.02.001>

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ВІДЕО У БЕЗПРОВІДНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МУЛЬТИПІДКЛЮЧЕННЯ

М. Медвецький [ORCID: 0000-0001-7260-0265], М. Бешлей [ORCID: 0000-0002-7122-2319], Г. Бешлей [ORCID: 0000-0001-5392-3499]

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: М. Медвецький (e-mail: mykhailo.b.medvetskyi@lpnu.ua).

(Подано 1 вересня 2023)

У статті запропоновано метод поліпшення якості передавання відеопотоку з використанням мультипідключення у програмно-конфігурованих безпроводних мережах. Метод використовує технологію бондингу для об'єднання різних фізичних мережевих адаптерів у один комбінований пристрій, що дає змогу ефективно використовувати ресурси мережі та забезпечувати високу якість відеопередавання. Дослідження також містить аналіз використання показника якості сприйняття PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) та реакцію методу на погіршення параметрів каналу зв'язку. Результати показують, що зі збільшенням втрат пакетів значення PSNR зменшується. Це пояснюється тим, що втрата пакетів призводить до появи помилок або шуму в стисненому сигналі, що знижує точність сигналу порівняно з оригіналом. Зокрема, втрати пакетів можуть бути спричинені нестачею пропускної здатності мережі, коли обсяг даних, які намагаються пройти через мережу, перевищує її можливості. У такому випадку втрати можуть стати причиною погіршення якості відеопотоку. З іншого боку, втрати пакетів через нестабільність радіосигналу можуть бути наслідком зовнішніх впливів, таких як перешкоди чи інтерференція, що здатні спричинити втрати пакетів навіть за достатньої пропускної здатності мережі. Ці втрати також можуть впливати на якість відеопотоку і знижувати значення PSNR. Під час дослідження виявлено, що однаковий відсоток втрат пакетів через нестачу пропускної здатності та вимушені втрати пакетів через нестабільність радіосигналу по-різному впливають на якість сприйняття зображення. Загальні результати дослідження підтверджують можливість істотного покращення якості обслуговування користувачів безпроводної мережі за допомогою запропонованого методу, не вимагаючи додаткових витрат ресурсів мережі. Це може мати велике практичне значення для розвитку передових мережевих технологій та забезпечення високої якості передавання відеоданих у сучасних безпроводних мережах.

Ключові слова: програмно-конфігуровані мережі; мережевий бондинг; мультипідключення; PSNR; WLAN.

УДК: 621.391

1. Вступ

Зростання кількості користувачів, які віддають перевагу перегляду відеоконтенту в інтернеті, через різноманітні мобільні пристрої, такі як смартфони, планшети та ноутбуки, сьогодні зумовлює підвищену увагу дослідників і підприємців до відеоконтенту. Покращення якості передавання

відеопотоків стає актуальним завданням [1]. І хоча існує багато методів його розв'язання, більшість з них розроблені з огляду на провідні мережі [2]. Це зумовлено тим, що в провідних мережах доступні різні шляхи передавання даних, тоді як у безпроводних мережах зазвичай є лише один доступний канал для організації зв'язку [3].

Сьогодні щільність покриття безпроводних локальних мереж (WLAN) надзвичайно висока у густозаселених містах. Отже, гіпотетично мобільний пристрій можна підключити до кількох точок доступу. Мультипідключення (або мультиз'єднання) – це технологія, яка дає змогу одному пристрою використовувати одночасно кілька інтерфейсів або з'єднань для передавання даних чи отримання доступу до мережі [4]. Припустимо, якщо мобільний пристрій має кілька фізичних безпроводних модулів, підключених до різних точок доступу, може існувати кілька шляхів передавання даних на мобільний пристрій через кілька точок доступу. Як показано на рис. 1, фізичний мережевий адаптер 1 підключений до точки доступу 1, а адаптер 2 – до точки доступу 2. У цьому випадку мобільний пристрій має два безпроводних канали для багатоканального передавання. Щоб уникнути проблеми, пов'язаної з обробкою з'єднання з двома безпроводними мережевими модулями відеоприймача, можна використовувати мережевий бондинг для інтеграції цих двох фізичних мережевих адаптерів (або більшої кількості адаптерів у загальному випадку) у комбінований пристрій, об'єднання потоку. Отже, плеєр може сприймати об'єднаний пристрій як один модуль безпроводної мережі, а відеопровайдер надсилатиме всі відео на об'єднаний пристрій.

Також у роботі запропоновано ідею використання віртуальних мережевих адаптерів, якщо мобільний пристрій має лише один фізичний мережевий адаптер. У фізичному адаптері безпроводної мережі створюється віртуальна мережева карта з парою віртуальних мережевих адаптерів. Ці адаптери можуть бути пов'язані з різними точками доступу, а для об'єднання віртуальних мережевих адаптерів у комбінований пристрій можна застосувати мережевий бондинг.

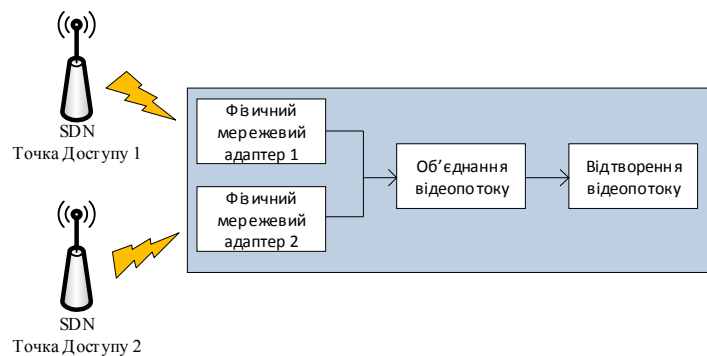


Рис. 1. Безпроводне мультипідключення (мультиз'єднання) у SDN з використанням кількох фізичних мережевих адаптерів

Отже, розроблення нових методів та технологій, що спрямовані на поліпшення якості сприйняття відео в безпроводних програмно-конфігурованих мережах за допомогою мультипідключення, має велике практичне значення і є актуальним завданням у сучасному інформаційному суспільстві. У роботі запропоновано метод багатозляхового передавання відеопотоку через безпроводний Wi-Fi канал програмно-конфігурованої мережі із використанням технології мультипідключення. Для перевірки ефективності запропонованого методу передавання відеопотоку виконано експерименти із використанням Mininet.

2. Використання PSNR як метрики оцінювання якості відеосприйняття

У цій роботі як метрику якості QoE використано PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), що є широковизнаною метрикою для оцінювання якості стиснення цифрового відео та зображень [5]. Цей параметр порівнює вихідний нестиснутий сигнал зі стисненим, обчислюючи відношення

максимально можливої потужності вихідного сигналу до потужності шуму, який вводиться стисненням. Іншими словами, PSNR вимірює, наскільки сильно стиснений сигнал відрізняється від оригіналу з погляду шуму або спотворень. PSNR визначають через середньоквадратичну похибку (MSE). Математичне подання PSNR таке:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (1)$$

де MSE (середньоквадратичну похибку) визначено за допомогою такого математичного типу:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - F(i, j)]^2}{MN}, \quad (2)$$

де $f(i, j)$ – вихідний сигнал; $F(i, j)$ – відновлений; $M \times N$ – розмір зображення; 255 – максимальне значення яскравості. PSNR виражають у децибелах, значення в діапазоні від 30 до 40 дБ характеризує відео середньої та високої якості.

Втрата пакетів є поширеною проблемою у цифрових мережах зв'язку, де пакети даних можуть бути втрачені або пошкоджені під час передавання. Це стається з різних причин, таких як перевантаження мережі, несправність обладнання або перешкоди. Втрата пакетів може істотно вплинути на якість передавання цифрового відео та зображень, оскільки здатна спричинити значні спотворення або артефакти в стисненому сигналі. Ми виконали дослідження, порівнявши вплив параметрів каналу зв'язку, таких як втрати пакетів, затримка та пропускна спроможність, на якість відеозображення. Результати дослідження наведено в табл. 1–4.

Дослідження здійснено в симуляторі Mininet. Наведемо топологію мережі, яка складається з двох користувачів (h1, h2) та одного комутатора (s1) на рис. 2.



Рис. 2. Топологія досліджуваної мережі

Таблиця 1

Вимірювання значень PSNR із внесенням затримки в канал зв'язку

Затримка, мс	50	100	150	250	450
PSNR	35,9058	35,9058	35,9058	35,9058	35,9058

У дослідженні у разі зміни затримки в каналі зв'язку значення PSNR не змінювались, лише збільшувався час передавання відеопотоку. Відсутність впливу затримки пояснюється тим, що під час розрахунку PSNR затримку не враховували. Також варто зауважити, що сучасні плеєри для відтворення відеопотоків здатні буферизувати кадри та відтворювати їх у правильній послідовності.

Досліджуючи вплив пропускної спроможності на передавання відеопотоку, спочатку ми визначили необхідну пропускну здатність для відеопотоку за допомогою програми Wireshark, яка становила 850 кбіт/с. Надалі здійснювали експерименти зі зміною рівнів пропускної здатності на такі значення: 0,850 кбіт/с, 0,4 кбіт/с, 0,3 кбіт/с та 0,2 кбіт/с. У табл. 2 наведено співвідношення загальної кількості відправлених медіасервером пакетів до кількості тих, які прийняв клієнт. На основі цього співвідношення можна легко оцінити вплив нестачі пропускної спроможності на відеопотік.

Таблиця 2

Вимірювання значень PSNR залежно від доступної пропускної спроможності

Пропускна спром., кбіт/с	0,850	0,4	0,3	0,2
R_x/T_x	905/905	905/664	905/556	905/377
Втрати пакетів, %	0	26,62	38,56	58,34
PSNR, дБ	35,9058	33,3108	26,8220	19,7618

У випадку встановлення пропускної спроможності на рівні 0,4 кбіт/с, що становить 47 % від максимально необхідної, втрати пакетів сягають 26,62 %. Загальний рівень PSNR – 33,31 дБ.

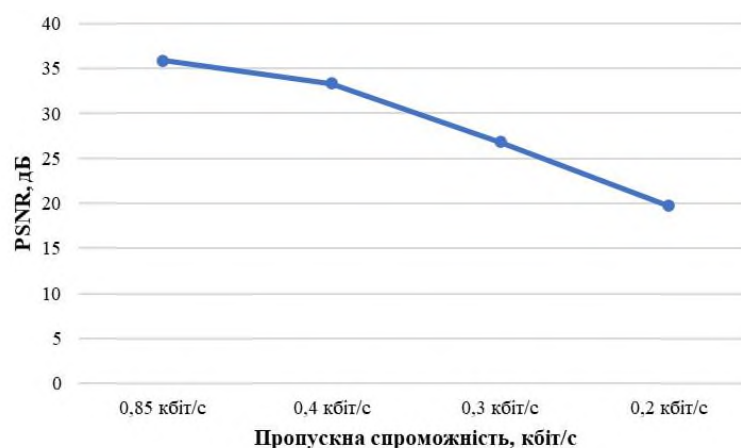


Рис. 3. Графік залежності рівня PSNR від пропускної спроможності

Додатково виконано дослідження із визначенням затримки з кінця в кінець за відповідних значень пропускної спроможності каналів зв'язку. Результати наведено на рис. 4. З графіків можна зробити висновок, що у разі зменшення пропускної спроможності пакети буферизуються, відповідно збільшується затримка пакетів.

Також здійснено дослідження із оцінюванням впливу втрат пакетів на оцінку PSNR без змін у пропускній спроможності каналів.

Зв'язок між PSNR і втратою пакетів простий: зі збільшенням втрат пакетів PSNR зменшується. Це пов'язано з тим, що втрата пакетів вносить помилки або шум у стиснений сигнал, що знижує точність сигналу порівняно з оригіналом. Як наслідок, значення PSNR зменшується, що вказує на гіршу якість або більші спотворення. Результати дослідження наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Вимірювання значень PSNR залежно від втрат пакетів

Задані втрати пакетів, %	0	2	5	15
R_x/T_x	905/905	912/899	905/872	905/793
Втрати пакетів, %	0	1,42	3,64	12,37
PSNR, дБ	35,9058	32,2635	26,6342	20,0374

Аналогічно до дослідження пропускної спроможності, в табл. 3 наведено співвідношення загальної кількості відправлених медіасервером пакетів до кількості тих, які прийняв клієнт. Згідно із цим відношенням обчислено втрати пакетів та отримано значення PSNR.

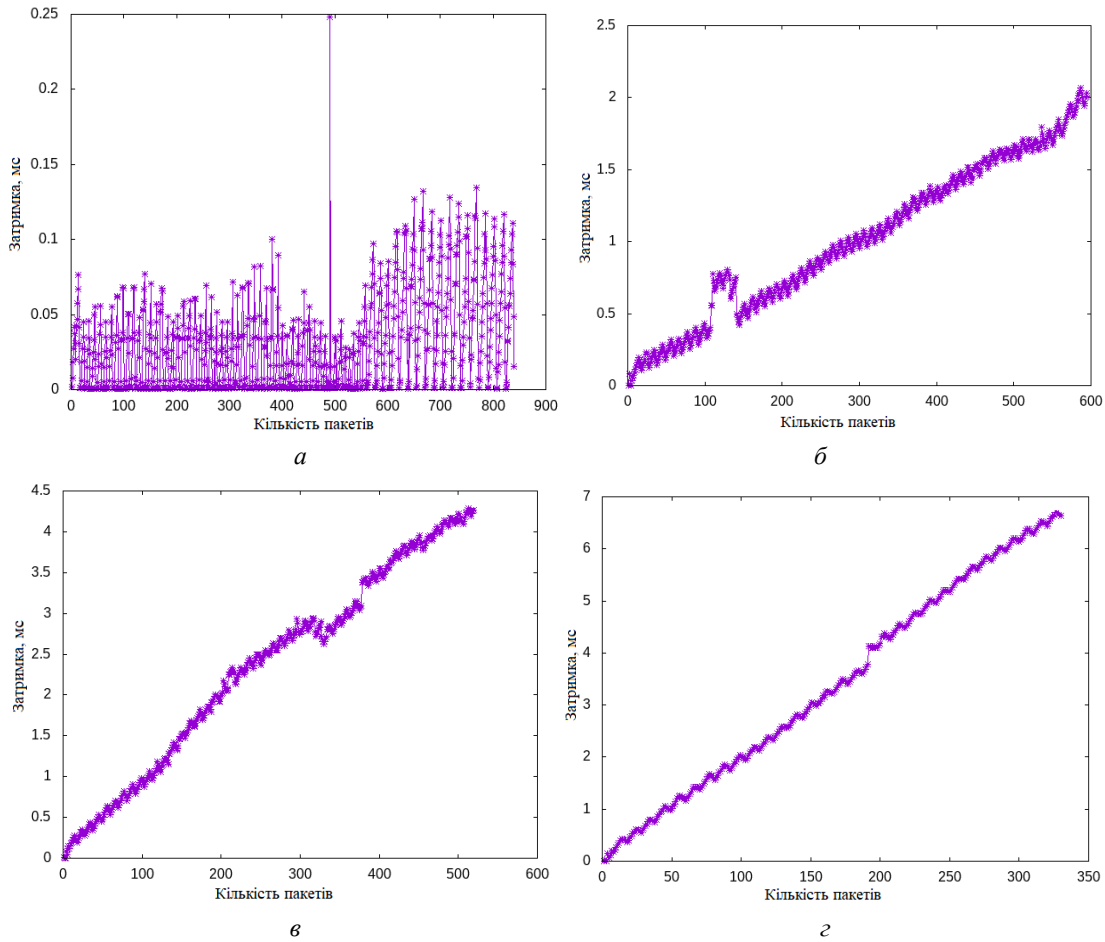


Рис. 4. Затримка з кінця в кінець за заданої пропускної спроможності:
 а – 0,850 кбіт/с; б – 0,4 кбіт/с; в – 0,3 кбіт/с; г – 0,2 кбіт/с

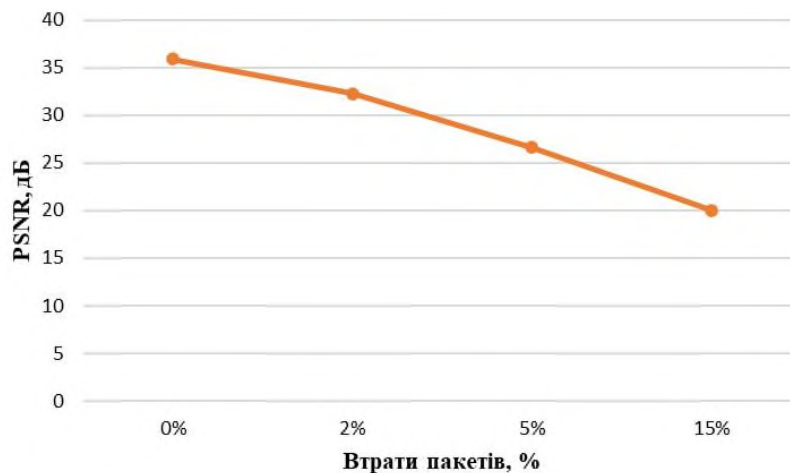


Рис. 5. Графік залежності рівня PSNR від втрат пакетів

Наприклад, згідно із табл. 2, у нас є відеопотік, який стискається за допомогою певного кодека. Значення PSNR спочатку вимірюється на рівні 35 дБ, що свідчить про високу якість стисненого сигналу. Однак, якщо швидкість втрати пакетів збільшується, значення PSNR буде відповідно зменшуватися. Якщо рівень втрат пакетів досягає 5 %, значення PSNR може впасти до 25 дБ або навіть нижче, що свідчить про значно гіршу якість стисненого сигналу.

Додатково виконано дослідження із вимірюванням затримки з кінця в кінець за зазначених втрат каналів зв'язку. Результати наведено на рис. 6. З них можна зробити висновок, що внесення штучних втрат не призводить до збільшення затримки в каналах зв'язку.

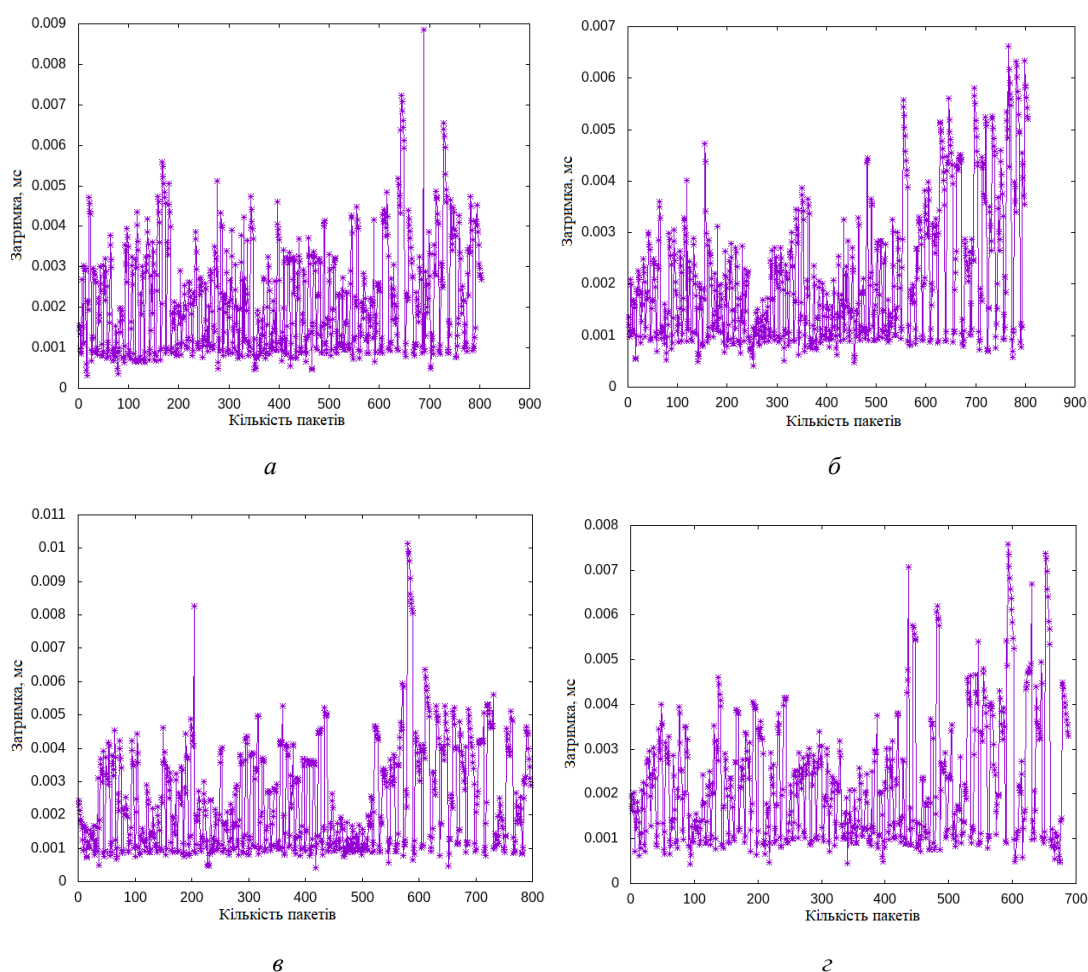


Рис. 6. Затримка з кінця в кінець за заданих втрат пакетів, %: а – 0; б – 2; в – 5; г – 15

За результатами досліджень сформовано таблицю відношення рівня PSNR та шкали від 1 до 5.

Таблиця 4

Відношення рівня PSNR та шкали оцінювання якості сприйняття

PSNR	Оцінка
>37	5 – Відмінно
31–35	4 – Добре
25–31	3 – Нормально
20–25	2 – Низько
<20	1 – Погано

Отже, PSNR є важливою метрикою для вимірювання якості цифрового відео та стиснення зображень, і втрати пакетів можуть істотно вплинути на його значення. Тому в наступному підрозділі описано дослідження, під час яких вносили штучні втрати та обмеження пропускної спроможності у каналах зв'язку.



Рис. 7. Порівняння кадру без втрат (а) та отриманого кадру (б) за втрат пакетів 2 %

3. Метод мультипідключення у безпроводних SDN мережах

Запропонований в роботі метод використання багатопотокового передавання відеопотоку у провідних та безпроводних програмно-конфігурованих мережах полягає у використанні мультиз'єднання мобільного пристрою з кількома точками доступу для одночасного передавання даних. Цей метод пропонуємо використовувати разом з системою адаптивного хендоверу, описаною у роботі [6].

Архітектуру такої мережі зображено на рис. 8. Як і класична архітектура програмно-конфігурованих мереж, запропонована архітектура складається із трьох рівнів: рівень додатків, рівень управління та рівень даних.

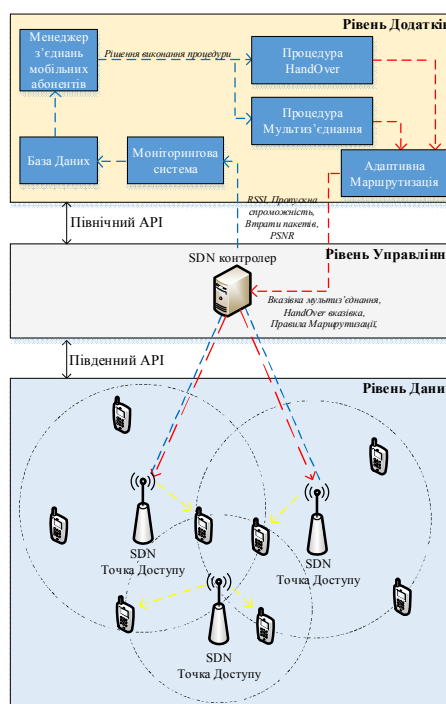


Рис. 8. Запропонована архітектура безпроводних програмно-конфігурованих мереж із мультипідключенням

Основні етапи функціонування методу в безпроводній SDN мережі:

1. Під час під'єднання мобільного пристрою абонента передається службова інформація, у якій вказано точку доступу, з якою з'єднано пристрій, рівень сигналу, доступність функції мультиз'єднання та доступні точки доступу для абонента.

2. SDN контролер періодично вимірює параметри мережі, серед яких: RSSI, втрати пакетів, залишкова пропускна спроможність та PSNR під час передавання відеопотоку. Ці дані обробляються моніторинговою системою та зберігаються у базі даних для можливого подальшого використання.

3. У випадку погіршення рівня PSNR менеджер з'єднань мобільних пристроїв приймає рішення про проведення процедури HandOver або ж мультиз'єднання, беручи до уваги отримані від абонента дані.

4. Залежно від вибраної процедури, застосовують відповідні правила адаптивної маршрутизації. Ці правила SDN контролер встановлює на відповідних мережевих пристроях. А у разі мультиз'єднання – надсилає правила для підключення мобільного пристрою до додаткових точок доступу.

Під час дослідження проведено серію експериментів у середовищі Mininet та з використанням ONOS контролера для програмно-конфігурованої мережі. Топологію мережі зображено на рис. 9. Вона складається з медіасервера, комутатора, трьох точок доступу та одного мобільного пристрою.

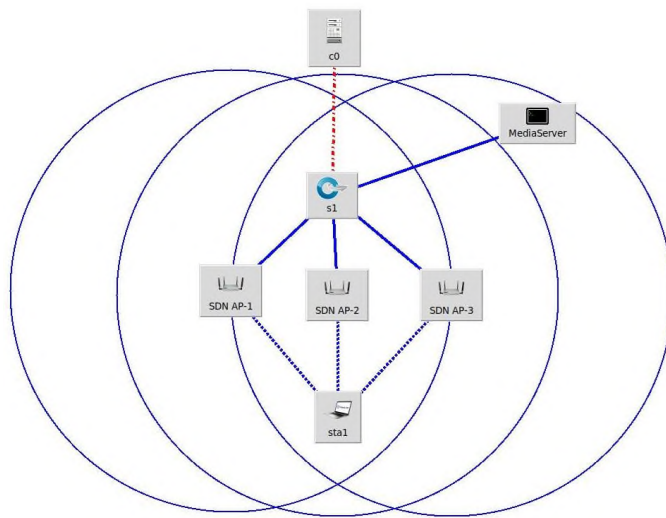


Рис. 9. Топологія досліджуваної безпроводної програмно-конфігурованої мережі

Сценарій № 1 використання мультиз'єднання мобільного пристрою

Розглянемо ситуацію, коли мобільний пристрій підключений до AP1. Канал зв'язку між точкою доступу та мобільним пристроєм завантажений та не може забезпечити необхідну пропускну спроможність для відеопотоку. В цьому випадку контролер визначає альтернативні точки доступу для здійснення хендоверу та виконує вимірювання параметрів каналів зв'язку потенційних маршрутів. Згідно із алгоритмом контролер вибирає застосування мультиз'єднання мобільного пристрою з AP1 та AP2. В такому випадку із необхідних 84 Мбіт/с AP1 дає змогу передати 50М біт/с, а AP2 – 34 Мбіт/с (рис. 10, а). Отриманий рівень сигналу PSNR становить 35,9 дБ. Такий спосіб дав змогу ефективно використати ресурси каналів зв'язку та забезпечити належний рівень сприйняття.

Сценарій № 2 використання мультиз'єднання мобільного пристрою з недостатністю пропускної спроможності

Проте не завжди можливо без втрат розподілити відеопотік між точками доступу. У цьому експерименті контролер не міг здійснити хендовер та забезпечити передавання відеопотоку через мультиз'єднання без втрат якості сприйняття. В такому випадку пропонуємо використовувати мультиз'єднання та розподіляти відеопотік між точками доступу відповідно до залишкової пропускної спроможності. В дослідженні задано обмеження пропускної спроможності каналу зв'язку

між точками доступу та мобільним пристроєм на рівні – 34 Мбіт/с із необхідних 84 Мбіт/с. Мультиз'єднання мобільного пристрою з точками доступу AP1, AP2 дасть змогу збільшити загальну пропускну спроможність відеопотоку до 68 Мбіт/с, що в результаті забезпечить оцінку якості сприйняття на рівні чотирьох балів – більше, ніж одичне передавання через завантажений канал.

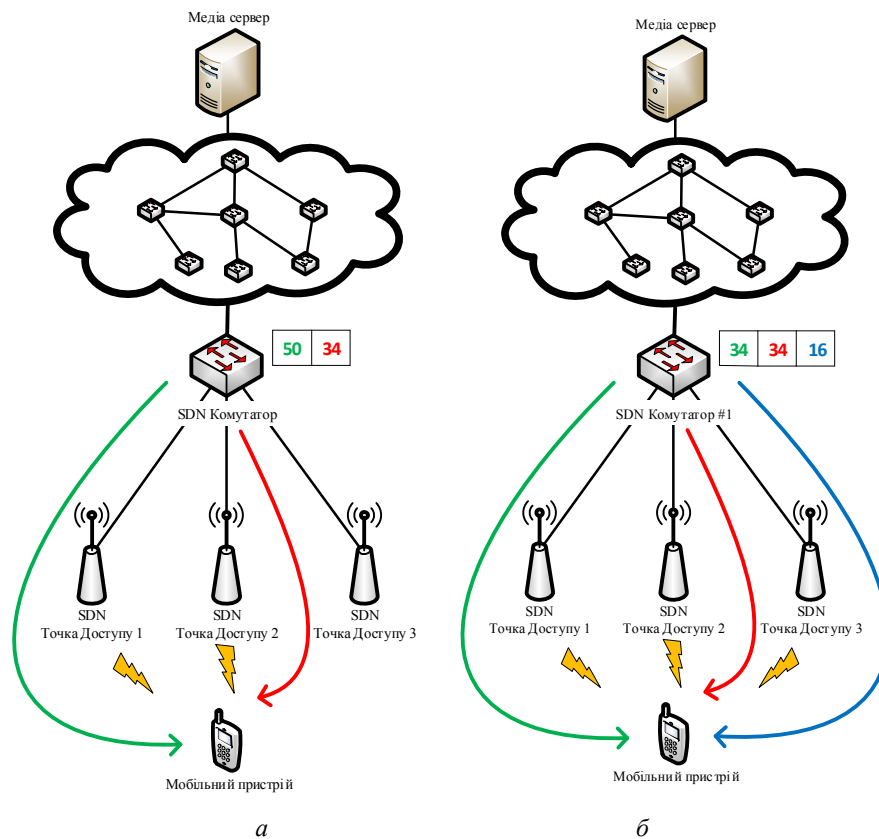


Рис. 10. Шляхи передавання та їх пропускну спроможність за сценаріїв № 1 (а) та № 3 (б)

Сценарій № 3 використання мультиз'єднання мобільного пристрою з трьома доступними точками доступу

Доповненням цього випадку є ситуація, коли для мобільного пристрою доступна AP3. В такому разі можна розподілити частину відеопотоку між трьома точками доступу, як показано на рис. 11, наприклад, так: AP1 = 34 Мбіт/с; AP2 = 34 Мбіт/с; AP3 = 16 Мбіт/с (рис. 10, б).

Сценарій № 4 використання мультиз'єднання мобільного пристрою з урахуванням втрат пакетів

Відповідно до результатів, викладених у підрозділі 2, важливо враховувати також втрати пакетів, що можуть виникнути у безпроводних мережах через різні фізичні чинники. Розглянемо ситуацію, коли мобільному пристрою доступні три точки доступу (AP1, AP2, AP3). Параметри каналів зв'язку такі: AP1 – 50 Мбіт/с; AP2 – 34 Мбіт/с, втрати пакетів 2 %; AP3 – 34 Мбіт/с, втрати пакетів 5 %. Тепер контролер із урахуванням додаткового параметра втрат пакетів розподіляє відеопотік через AP1 та AP2, щоб забезпечити найкращий рівень якості сприйняття. Отримані значення PSNR наведено на рис. 11.

На рис. 11 зведено результати різних сценаріїв досліджень, а також альтернативних рішень для відповідних сценаріїв.

Сценарій № 1 порівняно із використанням одного з'єднання за ідентичних заданих параметрів мережі. Альтернативним рішенням є стандартне передавання відеопотоку через точку доступу AP1,

яка забезпечує пропускну спроможність на рівні лише 50 Мбіт/с, що в результаті забезпечило рівень PSNR 33,8 дБ.

Сценарій № 2 порівняно з альтернативним рішенням передавання по одній точці доступу, яка забезпечує пропускну спроможність на рівні 34 Мбіт/с, що в результаті забезпечило рівень PSNR 30,6 дБ.

Сценарій № 3 порівняно з результатами альтернативного рішення про передавання відеопотоку з недостатньою пропускну спроможністю через дві точки доступу та без можливості підключення до третьої точки доступу. В такому випадку рівень PSNR альтернативного рішення є нижчим, ніж рішення із використанням трьох точок доступу.

Сценарій № 4 порівняно із альтернативним рішенням, коли контролер не бере до уваги втрати пакетів у каналах зв'язку, а приймає рішення про мультимедіа за рівнем сигналу та доступною пропускну спроможністю.

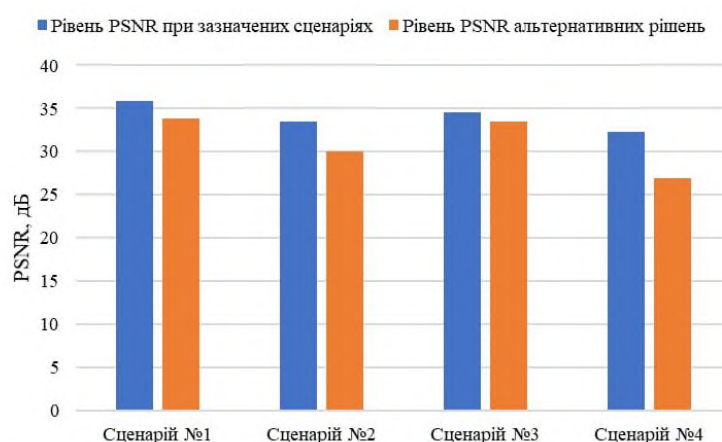


Рис. 11. Отримані рівні PSNR за вказаних сценаріїв та їх порівняння з альтернативними рішеннями

Висновок

Запропоновано метод використання мультимедіа у безпроводних програмно-конфігурованих мережах. Такий метод дає змогу ефективно передавати відеопотік у програмно-конфігурованих мережах та забезпечувати необхідний рівень якості сприйняття. Як QoE метрику метод використовує PSNR. На підставі даних, наведених у підрозділі 2, можна зробити висновок про доцільність використання такої метрики. Адже на рівень сигналу PSNR впливає як низька пропускну спроможність, так і втрати пакетів у мережі.

Проаналізувавши результати із підрозділу 3, бачимо, що запропонований метод може реагувати на погіршення параметрів каналу зв'язку та в разі необхідності приймати рішення про використання кількох точок доступу для передавання відеопотоку. Метод забезпечує ефективне використання ресурсів мережі, що дає змогу істотно покращувати якість сприйняття користувача без залучення додаткових ресурсів мережі.

Список використаних джерел

- [1] M. Beshley, N. Kryvinska, and H. Beshley, "Quality of service management method in a heterogeneous wireless network using Big Data technology and mobile QoE application," *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 127, No. 102771, 2023, p. 102771. DOI: 10.1016/j.simpat.2023.102771.
- [2] M. Beshley, N. Kryvinska, M. Seliuchenko, H. Beshley, E. M. Shakshuki, and A.-U.-H. Yasar, "End-to-end QoS 'smart queue' management algorithms and traffic prioritization mechanisms for narrow-

- band Internet of Things services in 4G/5G networks,” Sensors (Basel), Vol. 20, No. 8, 2020, p. 2324. DOI: 10.3390/s20082324.*
- [3] X. Zhang, P. Dong, X. Du, Y. Zhang, H. Zhang and M. Guizan, “Study on Characteristics of Metric-aware Multipath Algorithms in Real Heterogeneous Networks”, 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Madrid, Spain, 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685343.
- [4] C. -H. Ke, Y. -S. Chen and Y. -S. Yu, “Improving video transmission in software defined wired and wireless networks using multi-path transmission”, in *Journal of Communications and Networks*, Vol. 19, No. 6, Dec. 2017, pp. 587–595. DOI: 10.1109/JCN.2017.000099.
- [5] X. Shang, J. Liang, G. Wang, H. Zhao, C. Wu and C. Lin, “Color-Sensitivity-Based Combined PSNR for Objective Video Quality Assessment”, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 29, No. 5, 2019, pp. 1239–1250. DOI: 10.1109/TCSVT.2018.2836974
- [6] M. Beshley, M. Medvetskyi, S. Jun, A. Pryslupskyi, Y. Bobalo and H. Beshley, “QoE-Aware Intelligent Handover Method for Intent-Based Software-Defined Wireless Network”, 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 534–538. DOI: 10.1109/TCSET55632.2022.9767075.

ENHANCING VIDEO QUALITY IN WIRELESS SOFTWARE-DEFINED NETWORKS USING MULTI-CONNECTION

M. Medvetskyi, M. Beshley, H. Beshley

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

This article presents a method to enhance the quality of video streaming using multi-connection in software-defined wireless networks. The method utilizes bonding technology to combine various physical network adapters into a single integrated device, effectively utilizing network resources and ensuring high-quality video transmission. The study also includes an analysis of the use of the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) as a quality perception metric and the method’s response to deteriorating communication channel parameters. The results indicate that an increase in packet loss leads to a decrease in PSNR values. This is explained by the fact that packet loss introduces errors or noise into the compressed signal, reducing its accuracy compared to the original. Specifically, packet loss can be caused by insufficient network bandwidth when the volume of data attempting to pass through the network exceeds its capacity. In such cases, packet loss can lead to a deterioration in the quality of the video stream. On the other hand, packet loss due to radio signal instability may result from external factors such as obstacles or interference, which can lead to packet loss even with sufficient network bandwidth. These losses can also impact the quality of the video stream and reduce PSNR values. During the study, it was observed that an equal percentage of packet losses caused by insufficient network bandwidth and losses due to radio signal instability have different effects on image perception quality. In general, the overall research results confirm the potential for significant improvement in the quality of service for wireless network users using the proposed method, without requiring additional network resource expenditures. This can have significant practical implications for advancing network technologies and ensuring high-quality video data transmission in modern wireless networks.

Key words: *Software-Defined Networks; network bonding; multi-connection; PSNR; WLAN.*