



ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

МЕТОД ІНІЦІАЦІЇ ХЕНДОВЕРУ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІЙ БЕЗПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ПОСЛУГ

М. Медвецький, М. Бешлей, А. Прислупський, Г. Бешлей

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

Відповідальний за рукопис: М. Медвецький (e-mail: michaelmedv@gmail.com)

(Подано 5 грудня 2021)

Зважаючи на значне збільшення кількості інтелектуальних пристроїв із модулями Wi-Fi, а також прогноз зростання споживання даних на наступні роки, необхідно розробити нові методи побудови безпроводних Wi-Fi мереж з метою поліпшення якості сприйняття послуг з боку кінцевих користувачів. В роботі удосконалено концептуальну модель побудови програмно-конфігурованої Wi-Fi мережі, яка, на відміну від відомих, оснований на централізованому управлінні процесом вибору точки доступу обслуговування із використанням SDN контролера, за допомогою якого, здійснюючи моніторинг стану мережі в режимі реального часу, програмно реалізують власні рішення щодо ініціації хендверу. Розвинено метод ініціації хендверу в програмно-конфігурованій безпроводній Wi-Fi мережі, який, на відміну від відомих, під час прийняття керуючого рішення щодо вибору точки доступу обслуговування орієнтується на інтегральний критерій QoE, сформований на основі вимірювання у режимі реального часу параметрів, рівня сигналу, пропускну здатності, втрати даних та затримок у мережі Wi-Fi, що дало змогу поліпшити якість сприйняття послуг з боку кінцевих користувачів. Розроблені науково-прикладні рішення щодо процедури хендверу на основі QoE критерію зможуть на практиці застосовувати науково-дослідні організації, компанії, оператори мобільного зв'язку для покращення якості сприйняття послуг з боку користувачів у мережах із централізованим управлінням.

Ключові слова: SDN; SDWN; Mininet; QoE; QoS; ONOS; хендвер.

УДК 621.391

1. Вступ

Постійне зростання попиту на використання мультимедійних послуг через технологію Wi-Fi актуалізує тематику дослідження розвитку методів ініціації хендверу в безпроводних локальних мережах (Wireless Local Area Network, WLAN), які дають змогу користувачам досягати високошвидкісного передавання даних із гарантованою якістю обслуговування [1–3]. Крім того, мобільні пристрої, такі як планшети та смартфони, також стають все популярнішими через їхню низьку вартість та простоту використання, й очікується, що зростання використання мобільних пристроїв прискориться найближчими роками разом із доступністю та використанням таких програм, як послуги в режимі реального часу та онлайн-ігри. Як правило, хендвер (handover, HO) у

великомасштабних середовищах Wi-Fi вважається важливим процесом для забезпечення плавного переходу користувачів мобільних пристроїв між різними точками доступу для підтримки додатків у реальному часі [4]. Саме тому в роботі розглянуто відомі рішення, що стосуються алгоритмів та методів ініціації хендоверу в безпроводних Wi-Fi. На основі аналізу відомих робіт [5–8] визначено обмеження наявних рішень, такі як недостатня поінформованість про вимоги кінцевих користувачів щодо якості обслуговування, а також відсутність методів моніторингу основних параметрів (Quality of service, QoS). Встановлено, що хоча деякі відомі рішення щодо хендоверу здатні охопити вимоги до продуктивності станції (Station, STA), їх реалізація часто призводить до високої складності. І навіть більше, такі підходи, які зосереджуються на певному показнику продуктивності та на певній безпроводній технології, неможливо адаптувати для підтримки інших показників продуктивності або роботи із різними безпроводними технологіями. Традиційні методи хендоверу, швидше за все, не відповідатимуть вимогам мобільних пристроїв для сучасних додатків через відсутність інтелекту, недостатню обізнаність щодо якості обслуговування QoS та якості сприйняття (Quality of Experience, QoE) мобільних користувачів.

У роботі [9] обґрунтовано поняття якості сприйняття (QoE), яке нещодавно стало поширеним показником, що використовується в літературі [10] для вимірювання задоволеності користувачів. Тому QoE також є важливим параметром, який необхідно враховувати під час розроблення стратегій хендоверу у мережах Wi-Fi, щоб гарантувати необхідну якість сприйняття послуг.

Тому розроблення концептуальних архітектур, які підтримують горизонтальний хендовер за критерієм якості сприйняття послуг в однорідних мережах Wi-Fi, є актуальним завданням. Ця архітектура ґрунтується на концепції програмно-конфігурованої безпроводної мережі (Software-Defined Wireless Network, SDWN), у якій безпроводна мережа керується централізовано, а точки доступу (Access Point, AP) програмується. У цій архітектурі алгоритми НО допоможуть користувачам безпроводного зв'язку знайти мережу, яка найкраще підтримає вимоги додатків через політику керування якістю обслуговування (QoS) та якістю сприйняття (QoE).

2. Концептуальна модель побудови програмно-конфігурованої безпроводної Wi-Fi мережі для поліпшення якості сприйняття послуг

Програмно-конфігурована мережа ((Software-Defined Network, SDN) – це мережева парадигма, яка сприяє поділу між площиною керування та площиною даних, що дає змогу централізувати управління мережею в єдине ціле. SDN має певні особливості, які роблять його привабливим підходом до вирішення проблеми безперебійної мобільності, а саме зниження складності розгортання та конфігурування мережі, детальний моніторинг мережі та покращена масштабованість. Однією із головних особливостей функціонування SDN є можливість моніторингу та вимірювань основних параметрів якості обслуговування у режимі реального часу. Отже, SDN пропонує гнучкість і надійність з погляду моніторингу мережі, що також є ключовим компонентом НО як частина фази збирання інформації. Методи традиційного моніторингу та вимірювання поділено на дві методики – пасивну та активну. Пасивні методи вимірюють мережевий трафік лише за допомогою спостереження, тоді як активні методи – із введенням додаткових пакетів у мережу та моніторингом їхньої поведінки. У конкретному випадку SDN контролер отримує статистику моніторингу кожного потоку через OpenFlow, який є протоколом, що використовується як інтерфейс між площиною керування та площиною даних. Такий підхід дає змогу забезпечити контролеру SDN загальне бачення мережі та всіх потоків, що робить моніторинг ефективнішим і в майбутньому може допомогти підвищити продуктивність НО в безпроводних мережах.

Сьогодні SDN використовують у багатьох середовищах, однак знадобилося чимало років, щоб розгорнути SDN також у безпроводному середовищі. Це пояснюється тим, що середовище безпроводної мережі складніше, ніж багато провідних мереж, через проблему динамічності перешкод між сигналами, що вимагає більшого керуючого трафіку. І навіть більше, зростання споживання даних прямо пропорційне до збільшення кількості користувачів і поліпшення якості програми.

Проблема виконання хендоверу виникає, якщо абонент перебуває у зоні покриття двох і більше точок доступу. В класичному розумінні ініціалізація процесу хендоверу відбувається за ініціативи пристрою користувача, а перемикання здійснюється до точки доступу із найкращим рівнем сигналу, якщо таку знайдено. Тобто прийняття рішення відбувається лише з урахуванням рівня сигналу точки доступу. В такому випадку система НО ігнорує потенційну точку доступу з гіршим рівнем сигналу, але з кращими параметрами QoS, як зображено на рис. 1.

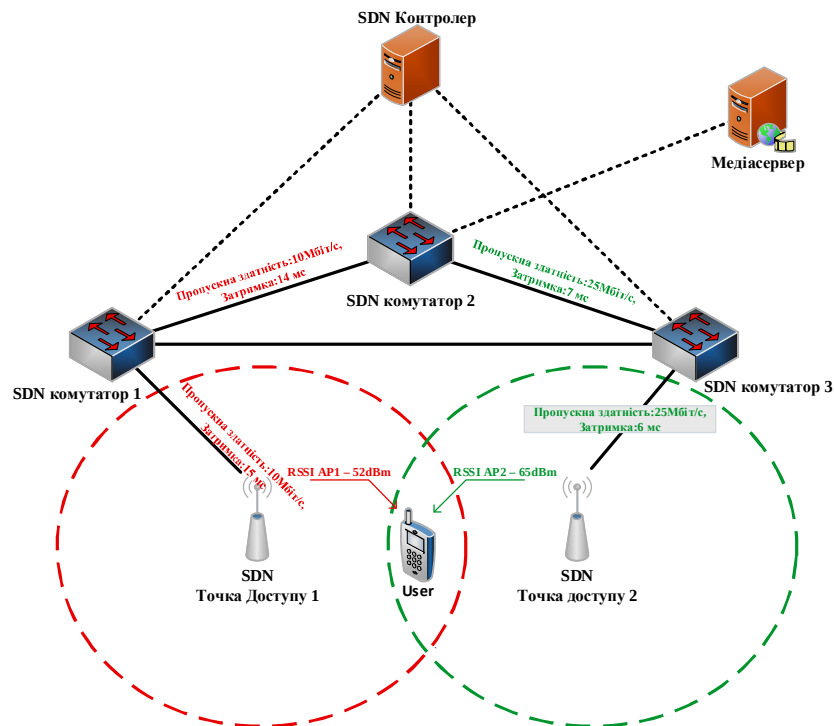


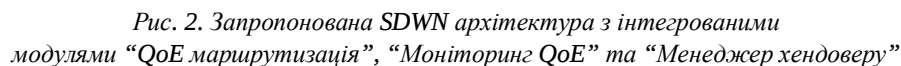
Рис. 1. Приклад проблеми виконання НО в SDN

Наприклад, користувач обслуговується точкою доступу 1 із рівнем сигналу X , крім цього, він перебуває у зоні дії точки доступу 2 із рівнем сигналу Y . Оскільки рівень сигналу AP1 кращий, користувач отримує середню якість сприйняття наданих послуг, через велику затримку та низьку пропускну спроможність на ділянці мережі AP1-Switch 1-Switch 2-Media Server. Проте ділянка мережі AP2-Switch_3-Switch_2-Media Server, через меншу завантаженість, може забезпечити кращу якість сприйняття для користувача. У такому разі доцільно було б виконати процедуру НО та перевести користувача на обслуговування до AP2.

На рис. 2 зображено запропоновану архітектуру. Загалом ця архітектура складається з трьох рівнів: рівень даних, або ж рівень інфраструктури, на якому розташовані мережеві пристрої; рівень управління, на якому SDN контролер керує процесами у мережі, завдяки протоколу OpenFlow; рівень додатків – множина програм, орієнтованих на дотримання бізнес-політик, забезпечення функцій управління мережею (балансування навантаження, моніторинг трафіку тощо). Контролер керує всіма точками доступу, полегшуючи цим виконання НО. І навіть більше, централізована природа SDN дає змогу контролеру отримати глобальне уявлення про мережу за допомогою моніторингу та вимірювань, які підтримуватимуть процес НО.

Особливість запропонованої архітектури – розроблені та інтегровані програмні модулі, які працюють на рівні додатків:

- Модуль “Моніторинг QoE” забезпечує вимірювання параметрів каналів зв’язку (затримка, втрати пакетів, пропускну здатність, RSSI) та оцінювання якості сприйняття користувача відповідно до вимірюваних параметрів [11].



- Модуль “База даних” – це база, у якій зберігаються параметри каналів зв’язу на відповідних ділянках мережі.
- Модуль “Менеджер хендоверу” приймає рішення про необхідність перемикання користувача, згідно із виміряними параметрами та передбаченим рівнем QoE на певній ділянці мережі.
- Модуль “QoE маршрутизація” забезпечує зміну правил маршрутизації згідно із вказівкою “HandOver Manager” [12].

Розглянемо результати дослідження, отримані з реалізацією HandOver Manager. Дослідження з практичної інтеграції розроблених модулів виконано у віртуальній мережі SDN з підтримкою технології Wi-Fi. Для побудови мережі використано емулятор Mininet Wi-Fi [13], який дає змогу розгорнути реалістичну віртуальну програмно-конфігуровану мережу на одній машині за кілька

секунд. Враховуючи активне розроблення та підтримку проєкту, на емульованих мережах можна розробляти та тестувати нові технології, а кінцевий результат не відрізнятиметься від реалізації на фізичних мережах. Як SDN контролер вибрано ONOS [14], як один із основних opensource SDN контролерів, який також активно підтримують розробники та використання якого доповнює підтримка передових технологій у сфері програмно-конфігурованих мереж та віртуалізації мережевих функцій.

Рис. 3 відображає процеси, здійснювані для реалізації запропонованого QoE-орієнтованого хендверу та типи повідомлення, якими обмінюються об'єкти в запропонованій SDWN архітектурі.

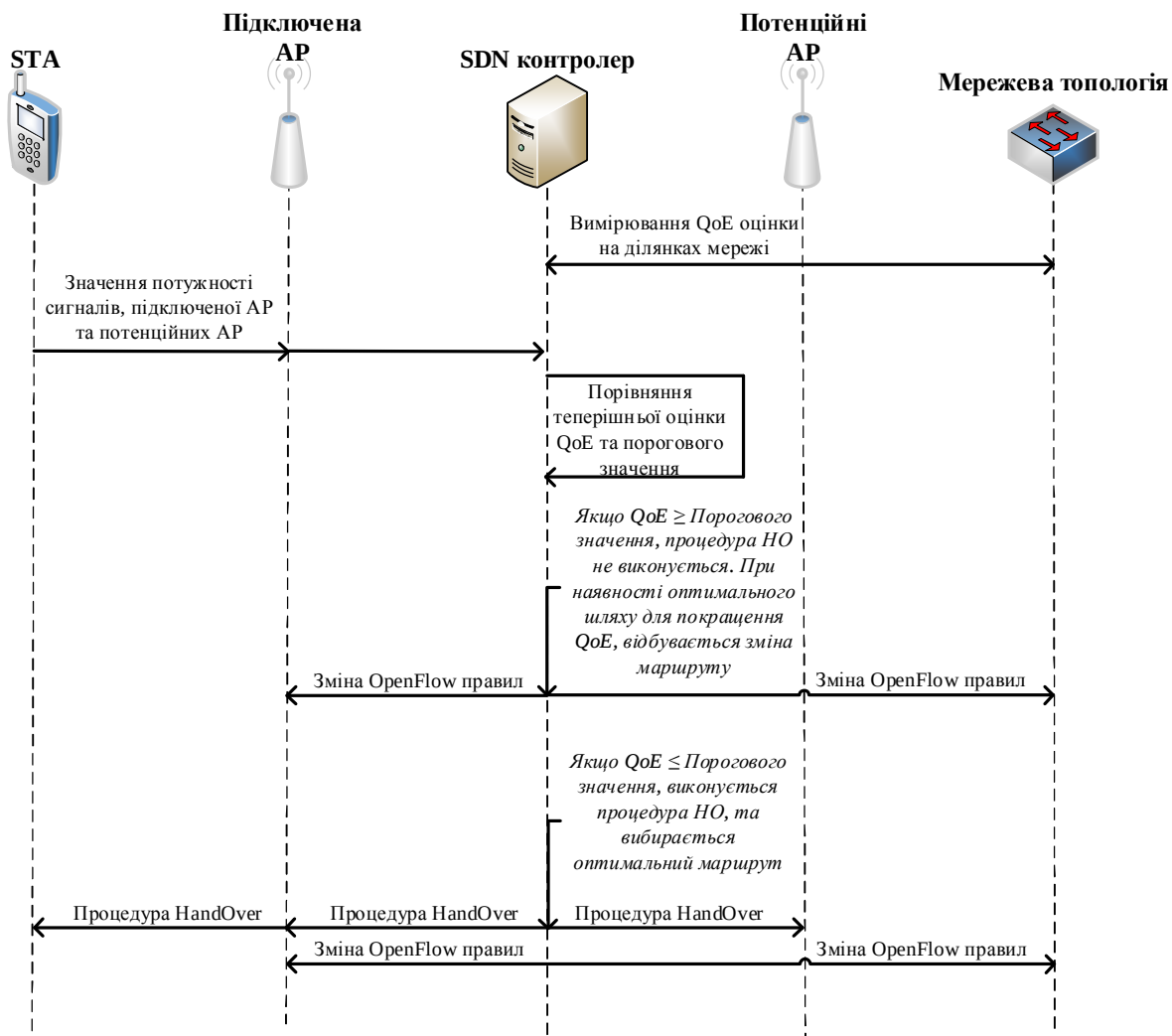


Рис. 3. Метод ініціації хендверу в SDWN на основі показника QoE

- STA інформують систему про поточний статус свого з'єднання, вимірюючи значення рівня сигналу, і періодично надсилатимуть їх через точки доступу до контролера мережі.
- Контролер оцінить поточний стан точки доступу та визначить, відповідає вона вимогам QoE STA чи ні. Зокрема, якщо поточна точка доступу не відповідає вимогам, контролер реалізовуватиме правила щодо адаптивної маршрутизації (пояснені в наступному кроці), щоб вибрати оптимальну AP.
- Контролер надішле рішення через повідомлення про перемикання та підтвердження нового хендверу.
- Поточна точка доступу надішле сигнал перемикання підтвердження до STA та повідомлення про підтвердження HO.

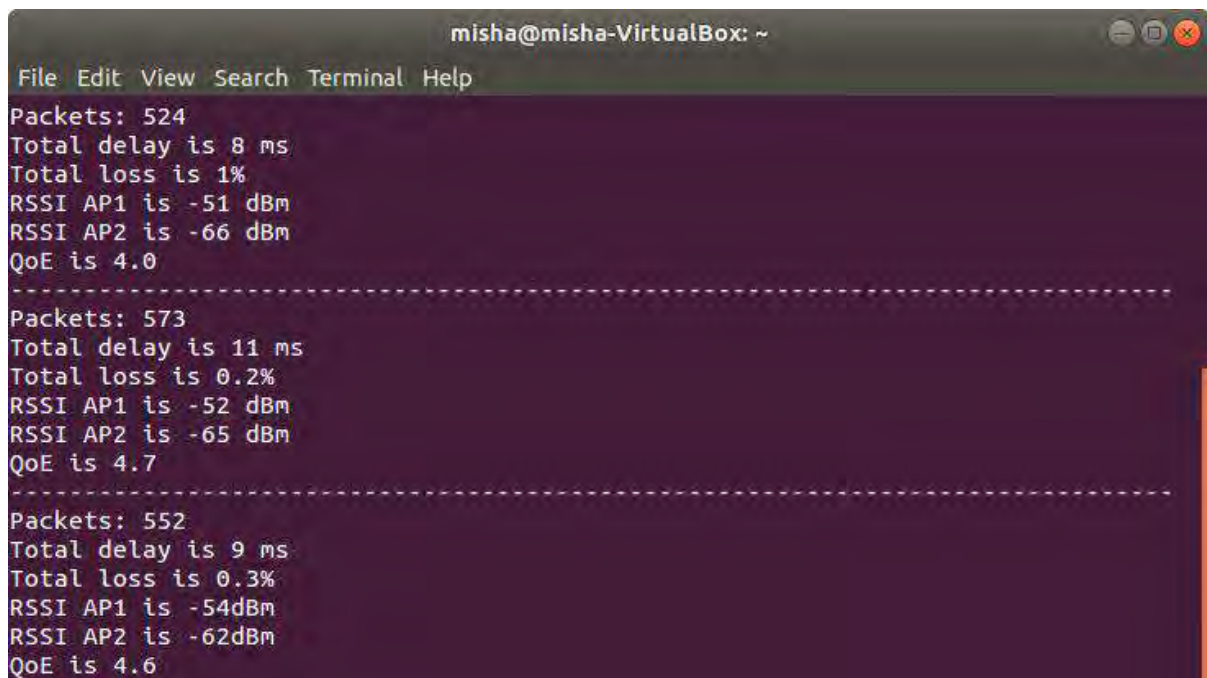
• STA надішле запит асоціації цільовій точці доступу, який повториться із повідомленням про прийняття як підтвердження НО.

У практичній реалізації інтеграції HandOver Manager в програмно-конфігуровану мережу здійснено дослідження із порівнянням рівня якості сприйняття у випадках класичного хендоверу та з упровадженням HandOver Manager для відеопотоку. Параметри мережі були згенеровані: для Latency – 0,001–0,015 с; Packet Loss – 0,25–5 % та записані в python скрипт (рис. 4). Кожні 5 с відбувалась зміна параметрів відповідно до згенерованих даних.

```
def cDelay1():
    s1.cmdPrint('ethtool -K s1-eth0 gro off')
    s1.cmdPrint('tc qdisc del dev s1-eth0 root')
    s1.cmdPrint('tc qdisc add dev s1-eth0 root handle 10: netem delay 100ms')

t=Timer(5.0, cDelay1)
t.start()
```

Рис. 4. Приклад функції для динамічної зміни затримки в каналі зв'язку



```
misha@misha-VirtualBox: ~
File Edit View Search Terminal Help
Packets: 524
Total delay is 8 ms
Total loss is 1%
RSSI AP1 is -51 dBm
RSSI AP2 is -66 dBm
QoE is 4.0
-----
Packets: 573
Total delay is 11 ms
Total loss is 0.2%
RSSI AP1 is -52 dBm
RSSI AP2 is -65 dBm
QoE is 4.7
-----
Packets: 552
Total delay is 9 ms
Total loss is 0.3%
RSSI AP1 is -54dBm
RSSI AP2 is -62dBm
QoE is 4.6
```

Рис. 5. Процес вимірювання параметрів та визначення оцінки QoE контролером

Отож, в емуляторі Mininet побудована топологія мережі, зображена на рис. 6. Складається мережа з п'яти SDN комутаторів, двох точок доступу, одного хоста, одного медіасервера та SDN контролера.

У дослідженні наведено результати для трьох методів проведення хендоверу: класичного НО, покращеного НО та адаптивного НО. Дані, отримані в результаті, наведено у табл. 1.

Класичний НО

Як зазначено вище, у класичному випадку процедура хендоверу урахує параметр потужності сигналу як основний критерій для прийняття рішення про підключення абонента до тієї чи іншої точки доступу. В такому разі ігноруються важливі параметри мережі: затримка, втрати пакетів, джитер тощо.

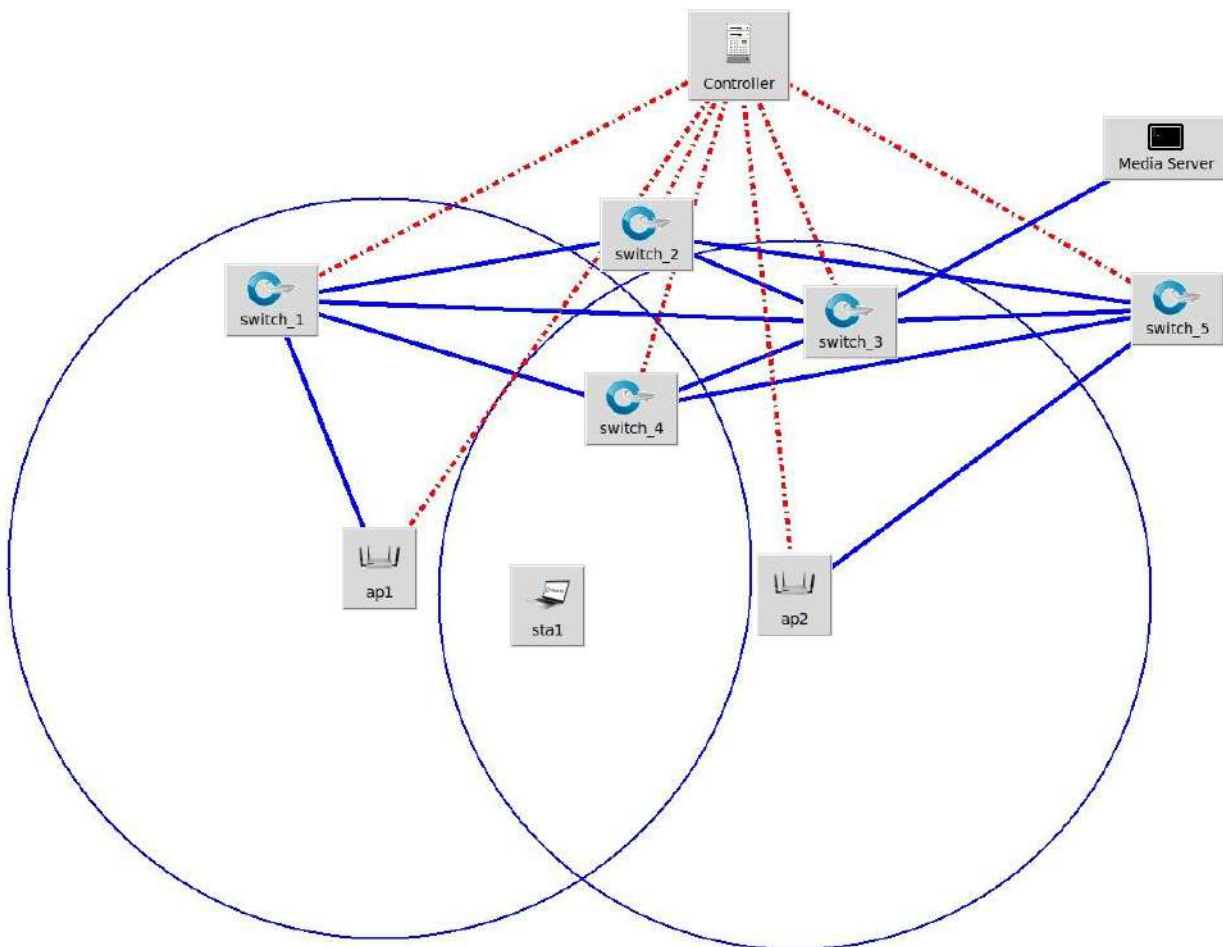


Рис. 6. Топологія досліджуваної програмно-конфігурованої безпроводної мережі в середовищі Mininet

Під час ініціалізації мережі користувач автоматично підключається до точки доступу AP1 з найкращою потужністю сигналу. Контролер прокладає найкоротший шлях між користувачем та медіасервером та встановлює правила OF для передавання даних. Відповідно до дерева шляхів, зображеного на рис. 7, для досліджуваної мережі у випадку AP1 найкоротшим шляхом є AP1-S1-S3-Медіасервер.

Покращений QoE-НО

За такого методу спершу користувач автоматично підключиться до точки доступу з найкращим рівнем потужності. Після цього контролер визначить рівень QoE та порівняє із пороговим значенням. Якщо рівень QoE більший від або дорівнює пороговому значенню, контролер прокладає найкоротший шлях між користувачем та медіасервером та встановлює правила OF для передавання даних. В іншому випадку контролер порівняє значення рівня QoE для найкоротшого шляху точки доступу AP1: AP1-S1-S3-Медіасервер та AP2: AP2-S5-S3-Медіасервер. Якщо з урахуванням рівня потужності AP2 та оцінки рівня QoE для найкоротшого шляху точки доступу AP2 кінцеве значення рівня QoE перевищуватиме порогове значення, контролер прийме рішення про ініціалізацію процесу НО.

Адаптивний QoE-НО

Цей метод доповнює попередній можливістю вибрати шлях маршрутизації, враховуючи QoS метрики, незважаючи на довжину шляху (рис. 7, Б). Тобто, враховуючи приклад попереднього методу, контролер визначатиме рівень QoE для всіх доступних шляхів точки доступу, а під час передавання даних зможе динамічно змінювати шлях, підтримуючи необхідний рівень QoE.

Загалом, функція прийняття рішень щодо адаптивного QoE-хендоверу ґрунтується як на функції вартості, так і на функції корисності. Зазвичай така стратегія охоплює суму зваженої функції деяких параметрів: SINR, пропускної здатності, втрати пакетів та затримок у мережі Wi-Fi. Загальна формула вартісної функції QoE-хендоверу для безпроводної мережі має вигляд:

$$f_n(HO_{QoEi-s}) = \sum_s \sum_i w_{s,i} p^{s,i}, \quad (1)$$

де $p^{s,i}$ – вартість i -го параметра для надання послуги S в мережі n з необхідним рівнем QoE; $w_{s,i}$ – вага (важливість), призначена за допомогою i -го параметра для надання послуг.

Канал зв'язку із найбільшою вартістю вибирають як оптимальний варіант для підключення. Отже, ця модель політики, основана на функції витрат, оцінює динамічні умови мережі та передбачає період стабільності (період очікування перед хендоверами), щоб гарантувати, що передавання обслуговування доцільне для кожної STA.

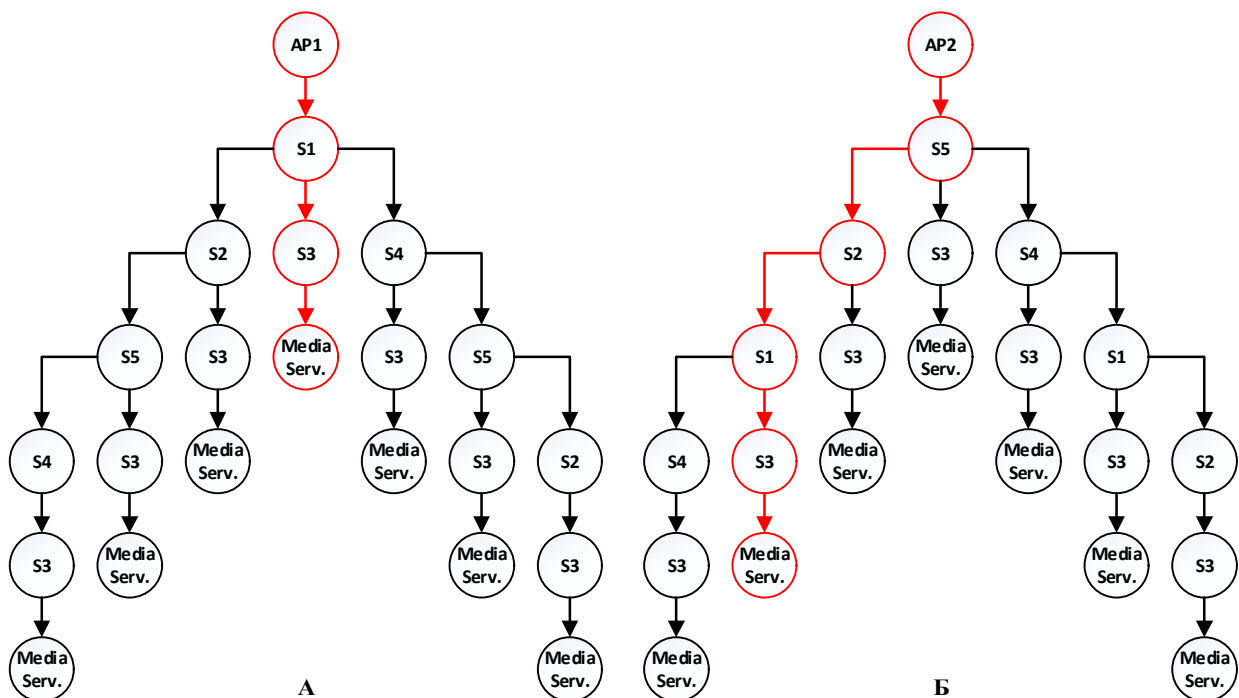


Рис. 7. Дерево шляхів для досліджуваної топології: А – доступні шляхи для AP1; Б – для AP2

На рис. 8 графічно зображено результати, викладені вище, для порівняння отриманого рівня QoE за класичного НО, покращеного НО та адаптивного НО.

З отриманих результатів видно, що за класичного НО до 25-ї секунди точка доступу AP1 та вибраний найкоротший шлях (рис. 7, А) забезпечували необхідний рівень QoE. Проте на 30-й секунді дослідження рівень QoE почав деградувати внаслідок змін, внесених створеним скриптом, що симулювало завантажені точки доступу та каналів зв'язку найкоротшого маршруту. Рівень знизився до 3,5, що нижче за встановлений пороговий рівень. Упродовж дослідження контролер не здійснював жодних спроб та змін для покращення ситуації, оскільки потужність сигналу точки доступу AP2 менша.

За покращеного НО до 25-ї секунди забезпечувався заданий пороговий рівень якості сприйняття, але на 30-й секунді, після погіршення параметрів мережі, контролер прийняв рішення про виконання процедури хендоверу до точки AP2 із найкоротшим шляхом до медіасервера. Таке рішення забезпечило відновлення рівня якості сприйняття до порогового значення упродовж всього дослідження.

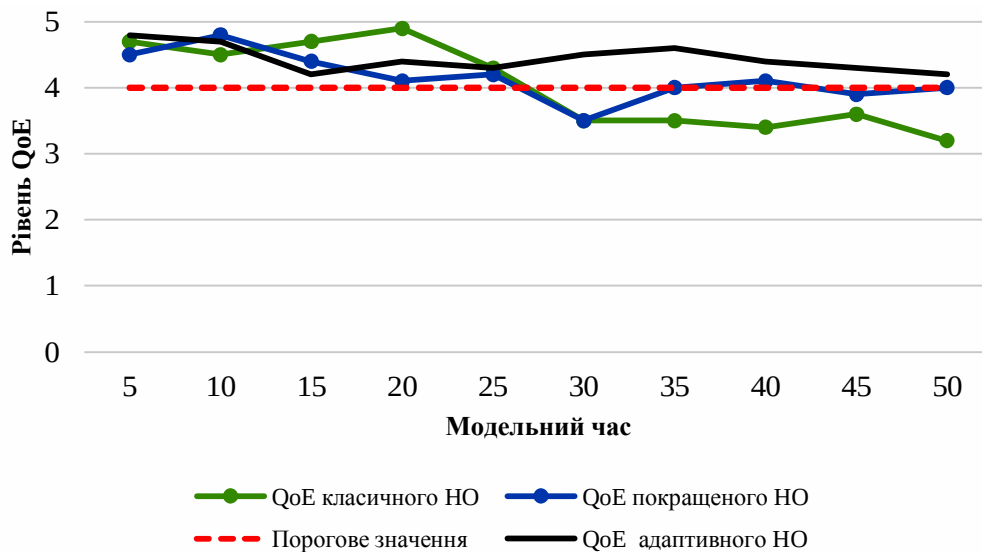


Рис. 8. Оцінка ефективності запропонованого методу ініціації хендоверу за критерієм QoE

У випадку з адаптивним НО на 25-й секунді під час зміни параметрів каналів зв'язку відбулась процедура НО до точки доступу AP2 із вибором шляху передавання даних, як зображено на рис. 7, Б. Також між 35-ю та 45-ю секундою через кожні дві секунди змінювались параметри каналів зв'язку мережі, в результаті чого контролер приймав рішення про динамічну зміну маршрутів передавання даних та процедури НО, використовуючи обидві точки доступу.

Висновок

У роботі запропоновано модуль для управління процедурою хендоверу на основі параметра QoE для інтеграції у безпроводні програмно-конфігуровані мережі. Використання розробленого модуля дає змогу виконувати процедуру НО не лише за рівнем потужності сигналу точки доступу, але й з урахуванням таких параметрів мережі, як затримка та втрати пакетів. Урахування цих параметрів дало змогу поєднати хендовер та динамічну QoE-маршрутизацію, щоб забезпечити високий рівень якості сприйняття. Згідно з отриманими результатами, запропонований алгоритм дає можливість швидко реагувати на раптові погіршення у мережі та забезпечувати необхідну якість сприйняття для кінцевого користувача. Проте недоліком цього методу є надлишковість службових даних моніторингової системи у каналах зв'язку між мережевим обладнанням та контролером, відповідно, збільшується навантаження на контролер та мережеве обладнання. Можливим вирішенням цієї проблеми є зменшення періодичності вимірювання параметрів каналів зв'язку та інтеграція модуля машинного навчання для передбачення рівня якості сприйняття.

Список використаних джерел

- [1] Nguyen-Vuong Q.-T., Agoulmine N., Cherkaoui E. H., and Toni L. (2013), "Multicriteria Optimization of Access Selection to Improve the Quality of Experience in Heterogeneous Wireless Access Networks", *Veh. Technol. IEEE Trans.*, Vol. 62, No. 4, pp. 1785–1800.
- [2] Wu X., O'Brien D. C., Deng X. and Linnartz J.-P. M. G. (2020), "Smart Handover for Hybrid LiFi and WiFi Networks", in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 19, No. 12, pp. 8211–8219, Dec. 2020. DOI: 10.1109/TWC.2020.3020160.
- [3] Li Y.-Y., Li C.-Y., Chen W.-H., Yeh C.-J. and Wang K. (2017), "Enabling seamless WiGig/WiFi handovers in tri-band wireless systems", 2017 IEEE 25th International Conference on Network Protocols (ICNP), pp. 1–2. DOI: 10.1109/ICNP.2017.8117571.

- [4] Sarma A., Chakraborty S. and Nandi S. (2016), "Deciding Handover Points Based on Context-Aware Load Balancing in a WiFi-WiMAX Heterogeneous Network Environment", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 1, pp. 348–357, Jan. 2016. DOI: 10.1109/TVT.2015.2394371.
- [5] Ahmed A., Boulahia L. M., and Gaiti D. (2014), "Enabling Vertical Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks: A State-of-the-Art and A Classification", *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, Vol. 16, No. 2, pp. 776–811, Jan. 2014.
- [6] Kassar M., Kervella B., and Pujolle G. (2008), "Autonomic-oriented architecture for an intelligent handover management scheme", *Proc. 6th Annu. Commun. Networks Serv. Res. Conf. CNSR 2008*, pp. 139–146.
- [7] Sivvam S., Neeraja S., and Raj C. D. (2019), "A Comprehensive Parametric Analysis of Vertical Handoff using Ant Colony A Comprehensive Parametric Analysis of Vertical Handoff using Ant Colony Optimization", November 2018, pp. 2–6.
- [8] Ray R. P. and Tang L. (2015), "Hysteresis Margin and Load Balancing for Handover in Heterogeneous Network", Vol. 4, No. 4, pp. 231–235.
- [9] Beshley M., Klymash M., Beshley H., Urikova O., and Bobalo Y. (2022), "Future Intent-Based Networking for QoE-Driven Business Models", in *Future Intent-Based Networking*, Cham, pp. 1–18. DOI: 10.1007/978-3-030-92435-5_1.
- [10] Barakabitze A. A. et al., "QoE Management of Multimedia Streaming Services in Future Networks: A Tutorial and Survey", in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, No. 1, pp. 526–565.
- [11] Medvetskyi M., Beshley M. and Klymash M. (2021), "A Quality of Experience Management Method For Intent-Based Software-Defined Networks", 2021 *IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, pp. 59–62. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9385250.
- [12] Pryslupskyi A., Beshley M., Beshley H., Pyrih Y., and Branytskyy A. (2022), "QoE-Oriented Routing Model for the Future Intent-Based Networking", in *Future Intent-Based Networking*, Cham, pp. 128–144. DOI: 10.1007/978-3-030-92435-5_7.
- [13] Mininet-Wifi: <https://mininet-wifi.github.io>.
- [14] Van Tu N., Hyun J. and Hong J. W. (2017), "Towards ONOS-based SDN monitoring using in-band network telemetry", 19th *Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 76–81. DOI: 10.1109/APNOMS.2017.8094182.

HANDOVER INITIATION METHOD IN A SOFTWARE-DEFINED WIRELESS NETWORK BASED ON QUALITY OF EXPERIENCE INDICATOR

M. Medvetskyi, M. Beshley, A. Pryslupskyi, H. Beshley

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

A significant increase in the number of smart devices with Wi-Fi modules and the forecast growth of data consumption in the coming years requires the development of new methods of designing Wi-Fi networks to improve the quality of experience for end-users. In this regard, the paper improved the conceptual model of software-defined Wi-Fi network, which, in contrast to the known, is based on centralized control of the selection process of access point service by using SDN controller and by monitoring the state of the network in real-time by software to implement its own solutions to initiate the handover. The method of handover initiation in the software-defined wireless Wi-Fi network is developed. This method to make a control decision to select the access point of service, is based on an integral criterion of QoE generated from measurements in real-time parameters, signal strength, throughput, data loss and delay in the Wi-Fi network, which improved the QoE by end-users. The use of the developed scientific-applied solutions for the handover procedure based on the QoE criterion will allow to apply in practice the research organizations, companies, mobile operators to improve QoE.

Key words: SDN; SDWN; Mininet; QoE; QoS; ONOS; Handove.