

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИКА ВПРОВАДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ  
СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61  
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Поліщук М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Руденко Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ДОСЛІДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .	11
1.1 Актуальні технологій супутникового зв'язку .....	11
1.2 Інтеграція супутникових і 5G-мереж.....	17
1.3 Останні досягнення у супутниковому зв'язку 5G .....	19
2 АНАЛІЗ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ПРИДАТНІ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ В НАЙБЛИЖЧОМУ МАЙБУТНЬОМУ .....	25
2.1 Застосування супутників із підтримкою SDN для супутниково-земної інтеграції .....	25
2.2 Основи архітектур SDN.....	27
2.3 Архітектура супутникової мережі.....	32
2.4 Можливі моделі даних та інтерфейси SDN.....	37
3 ЕФЕКТИВНІ ШЛЯХИ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	43
3.1 Інтеграційний підхід для TE на основі E2E SDN у наземно-супутникових транзитних мережах.....	43
3.2 Розрахунки необхідні для інтеграції наземно-супутникового зв'язку.....	58
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	80
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....	84

## ВСТУП

Перші видання про супутникові комунікації почали опубліковуватись після 1980-х років, а надалі дослідження лише набували популярності. За роки, що минули з моменту появи перших видань, відбулося багато змін із повним переходом від аналогових до цифрових систем зв'язку. Запуск супутників, який колись належав державним установам, тепер є процвітаючим комерційним бізнесом.

Методи аналогової передачі були замінені цифровою модуляцією та цифровою обробкою сигналу. Супутники *Spinner* практично зникли, замінені значно більшим діапазоном супутників від кубсатів з масою менше 1 кг до великих супутників GEO з масою понад 6000 кг. У той час як розповсюдження телевізійних програм залишається найбільшим сектором комерційного супутникового зв'язку, заробляючи приблизно половину світового доходу від систем супутникового зв'язку, низькоорбітальні угруповання супутників для доступу до Інтернету збираються кинути виклик цьому домінуванню.

Супутникові системи зв'язку зробили дуже значний внесок у світову економіку та суспільство. Міжнародний телефонний дзвінок, який у 1960 році коштував 1 долар США за хвилину, у 2000 році можна було набрати за менш ніж 0,02 долара США за хвилину. Беручи до уваги інфляцію, вартість зв'язку зменшилася більш ніж у 1000 разів, і це стверджує, що дуже небагато інші служби можуть зробити. Доступ до Інтернету стане доступним для 3 мільярдів людей у країнах, де немає наземної системи зв'язку, оскільки будуть запуснені нові угруповання супутників LEO. Глобальні супутникові навігаційні системи допомагають автомобілістам знайти дорогу до місця призначення та роблять подорожі на кораблях і літаках безпечнішими. Двосторонній телевізійний зв'язок через супутник дозволяє новинам з будь-якої точки світу бути доступними 24 години на добу.

Волоконно-оптичні системи зробили значний внесок у ці досягнення, але супутникові системи надають послуги скрізь, де є потреба трансляції в багатьох

місцях. Цей внесок у якість життя став можливим завдяки зусиллям тисяч телекомунікаційних інженерів, які розробляють, виробляють і обслуговують системи, які дозволяють нам спілкуватися майже з будь-ким і будь-де. Рідко ці інженери отримують визнання від широкої громадськості за ці досягнення.

Тема супутникового зв'язку обширна, але автор вважає за потрібне обговорити саме методики більш активного впровадження супутникових мереж в буденне життя.

Супутниковий зв'язок (SatCom) відіграє життєво важливу роль у світі бездротового зв'язку завдяки своїй здатності транслювати телекомунікаційні послуги на широкі географічні території та забезпечувати ширококутовий зв'язок у малонаселених віддалених регіонах, які зазвичай недоступні або недостатньо обслуговуються інфраструктурою наземного зв'язку. Технології SatCom були значно корисними для подолання цифрового розриву в сучасну інформаційну епоху, сприяючи економічному та соціальному розвитку сільських громад і країн, що розвиваються. Незважаючи на те, що у світі наземного бездротового зв'язку є кілька досягнень щодо збільшення пропускної здатності та покриття, SatCom є єдиним життєздатним варіантом для надання телекомунікаційних послуг у широкому діапазоні секторів, таких як авіаційний, морський, військовий, рятувальні служби та допомога при стихійних лихах. Більше того, попит на нові додатки, такі як телебачення високої чіткості, інтерактивні мультимедійні послуги та ширококутовий доступ до Інтернету, швидко зростає, що призводить до постійно зростаючої потреби в системах SatCom. Що ще важливіше, щоб задовольнити очікування споживачів щодо безперебійного доступу до будь-яких телекомунікаційних послуг у будь-який час і в будь-якому місці, включаючи сценарії, такі як подорожі на круїзних лайнерах, літаках і високошвидкісних потягах, супутник повинен стати важливим компонентом майбутнього п'ятого покоління (5G) і поза бездротовими архітектурами.

Очікується, що майбутній бездротовий зв'язок 5G і далі підтримуватиме величезну кількість інтелектуальних пристроїв, підключених датчиків і масивних

комунікаційних пристроїв машинного типу (МТС), які мають різноманітні вимоги до якості обслуговування (QoS).

У цьому напрямку передбачається, що бездротові системи 5G забезпечать збільшення пропускної здатності в 1000 разів, швидкість передачі даних для кінцевих користувачів у 10–100 разів, затримку в 5 разів меншу, енергоефективність пристроїв із низьким енергоспоживанням у 10 разів збільшену та підтримку в 10–100 разів більша кількість підключених пристроїв у порівнянні з поточними системами 4G. Крім того, очікується, що різні нові бездротові системи, такі як широкосмугові системи, Інтернет речей (IoT) і системи МТС, будуть інтегровані з успадкованими мережами для використання вже розгорнутих технологій, таких як 2G, 3G, довгострокова еволюція (LTE), LTE-advanced, Wi-Fi і супутник. Однак існує кілька проблем, пов'язаних із задоволенням вимог до неоднорідних послуг щодо досяжного покриття, швидкості передачі даних, затримки, надійності та споживання енергії, а також у наданні конвергентних бездротових рішень для кінцевих користувачів. Головним чином, майбутні бездротові мережі повинні будуть забезпечувати підключення будь-де, будь-коли та будь-якого пристрою в широкому діапазоні нових додатків, включаючи промислову автоматизацію, підключений автомобіль, E-Healthcare, розумне місто, розумний дім, розумну мережу, зв'язок на місці. рухомі та високошвидкісні платформи, такі як поїзди, літаки та безпілотні літальні апарати (БПЛА).

**Метою роботи** – є дослідження методів впровадження новітніх технологій супутникового зв'язку для покращення його якості та швидкості передачі даних, а що не менш важливо, дозволить передавати дані в важкодоступні регіони.

**Об'єкт роботи** – процес взаємодії всіх ланок супутникового зв'язку, а також взаємодія цього зв'язку з уже існуючою інфраструктурою мережі.

**Предмет роботи** - методи впровадження новітніх технологій супутникового зв'язку та доступні способи їх інтеграція в найближчому майбутньому.

# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Актуальні технології супутникового зв'язку

Одною з передових та найбільш відомих 5G. Наступне покоління систем мобільного радіозв'язку забезпечить багато змін, якщо порівнювати з попередніми поколіннями. Особливо це стосуватиметься здатності опрацьовувати значні об'єми трафіку даних з меншими затримками, а отже за короткий проміжок часу, також відбудеться і покращення якості взаємодії з користувачем водночас зі значним зниженням споживання енергії, що в наш час є надзвичайно важливим. Окрім цього автор вважає, що в майбутньому системи повинні будуть взаємодіяти з мільярдами речей (Інтернет речей (IoT)). Але при чому тут супутники? Супутникові системи розширяють можливість надання послуг 5G і вирішуватимуть деякі основні проблеми щодо підтримки зростання мультимедійного трафіку, повсюдного покриття, міжмашинного зв'язку (M2M) і критичних телекомунікаційних місій, одночасно оптимізуючи співвідношення ціни та якості, IoT, забезпечать стійкість та зможуть виконувати кешування вмісту та багатоадресну передачу, а також взаємодіяти в інтегрованій супутниково-земній архітектурі.

Також загальні технічні вимоги до мережі 5G, визначені приватним партнерством інфраструктури 5G (5G PPP), можна підсумувати наступним чином:

- У 1000 разів більший обсяг мобільних даних на охоплюваній території;
- У 10–100 разів більше підключених пристроїв;
- У 10–100 разів вища типова швидкість передачі даних для користувачів;
- у 5 разів менша наскрізна затримка,
- У 10 разів довший термін служби батареї для малопотужних пристроїв

Вільний доступ до 5G, у будь якому місці, у тому числі в районах з низькою щільністю населення.

З вище написаного автор може зробити висновок, що на даному етапі чисто супутникова система 5G не буде повністю функціональною, але може доповнювати наземний зв'язок, зокрема у випадках:

Сприяння розгортанню послуги 5G у не обслуговуваних районах, які не можуть бути охоплені наземною мережею 5G, а також у районах із недостатнім обслуговуванням. Крім того, покращити продуктивність обмежених наземних мереж економічно ефективним способом.

Підвищення надійності послуг 5G шляхом забезпечення безперервності обслуговування для пристроїв M2M/IoT або для пасажирів на борту рухомих платформ. Крім того, для забезпечення доступності послуг у будь-якому місці, особливо для критичних комунікацій.

Забезпечення масштабованості мережі 5G шляхом забезпечення ефективного багатоадресного/широкомовного ресурсу для доставки даних до межі мережі.

Загальна мета 5G — забезпечити повсюдне підключення для будь-яких пристроїв і будь-яких програм. Це можна реалізувати лише шляхом інтеграції супутників із мережею 5G. В порівнянні з наземними операторами стільникового зв'язку, оператори супутникового зв'язку можуть забезпечити єдину глобальну мережу та зменшити витрати на експлуатацію та підтримку. Що в свою чергу, зробить економічно ефективними глобалізацію послуг та доставку даних можливим іноді лише за допомогою супутникових технологій. Це спростить доставку даних і інших послуг у віддалені місця, пасажиром в літаках, поїздах і на судах, у важкодоступні райони (надзвичайні та критичні сценарії), а також доставка на великі відстані за межі країни є головною ринковою можливістю для операторів супутникових мереж (SNO). Крім того, очікується, що перевага супутників щодо покриття ще більше зросте в світлі наступних фактів:

Мегагрупа супутників LEO, які можуть запропонувати такі послуги, як ефективний глобальний транзит і доступ, з будь якої точки планети, до точної геолокації.

Майбутнє розгортання ресурсів хмарних обчислень у космосі.

Збільшення пропускної здатності завдяки новим концепціям, таким як просторове повторне використання частот і збільшення спектральної ефективності за допомогою нових кодів модуляції.

Удосконалення технологій, які використовують прогнозне положення супутників і геолокацію наземного обладнання, що веде до розробки адаптивних та ефективніших схем.

Далі автор вважає за доцільне обговорити питання масивних комунікацій машинного типу

Масивні комунікації машинного типу передбачають можливість підтримувати величезну кількість недорогих пристроїв Інтернету речей (з'єднань) з дуже тривалим часом автономної роботи та широким покриттям, включаючи приміщення. Експоненційне збільшення кількості підключених пристроїв вимагає розгляду нових технологій для масивного агрегування даних і трансляції даних, які виходять за рамки наземного радіо. Власні можливості супутників для трансляції, які дозволяють їм охоплювати дуже велику кількість пристроїв, споживаючи лише обмежену кількість ресурсів, роблять їх максимально придатними для розосереджених мереж M2M. Супутникові мережі пропонують засоби для масивного агрегування даних через середовище геоспостереження, а також засоби для дуже ефективного спільного використання висхідної лінії зв'язку з дуже великою кількістю підключених мережевих областей. Крім того, супутники вже підтримують програми відстеження активів, які можна масштабувати для підтримки майбутніх комунікацій M2M/IoT. З іншого боку, розгортання великої кількості пристроїв створює явну операційну проблему, оскільки пристрої потрібно час від часу підтримувати (виправлення безпеки тощо), налаштовувати та оновлювати. Супутники можуть підтримувати/подолати операційні проблеми, пов'язані з масовим розгортанням, за допомогою наступного:

Ефективне поширення даних у великому масштабі та з глобальним охопленням, що доповнює наземне розгортання.



Висока пропускна здатність на вимогу без необхідності розгортання додаткової наземної інфраструктури. Природа на вимогу пов'язана з тим, що більшість послуг M2M вимагають періодичного зворотного зв'язку.

Забезпечення достатньо ефективної альтернативи зв'язку для M2M. Супутники також можуть бути альтернативою для віддалених і ізольованих районів, а також у щільних міждомених мережах, де пакети даних повинні проходити через кілька автономних систем, щоб досягти місця призначення. Це відображає поточний ринок супутникової мережі, де M2M зараз стає однією з важливих послуг підключення.

Роумінг за допомогою одного супутникового оператора. Супутникові мережі можуть охоплювати широку територію, перетинаючи будь-які типи кордонів і завдяки цьому забезпечуючи доступність підключення через одного провайдера, що є більш економічно вигідним

Активация та налаштування пристрою через супутник для використання інфраструктури локальної мережі.

Резервне копіювання для безперервної доступності підключення, коли наземна мережа недоступна.

Тепер обговоримо супутниково-наземну інтеграцію в 5G (рис. 1.1).

Інтеграція супутникового зв'язку з наземними системами мобільного зв'язку завжди була складною через підхід до кожного сектору. Отже, з такою інтеграцією зазвичай пов'язана масштабна модернізація та висока вартість. Наприклад, поточні супутникові мережі в основному підтримують транзитну мережу 2G для фіксованих сайтів з обмеженим підключенням і сценаріями надзвичайних ситуацій, у той час як мережі 3G і LTE зараз проводять значні інженерні зусилля для адаптації стандартів до конкретних характеристик супутників. Водночас вимога конвергенції нової екосистеми 5G пропонує рідкісну можливість подолання деяких бар'єрів, пов'язаних з інтеграцією попередніх поколінь розгортання наземних мереж шляхом розробки єдиного середовища з початкових етапів розробки. Крім того, це також дає змогу галузям супутникового та мобільного зв'язку працювати разом над визначенням та

специфікацією цілісної системи 5G. Такий цілісний підхід гарантує, що супутниковий зв'язок зможе вирішувати деякі проблеми, пов'язані з підтримкою вимог, передбачених для мереж 5G.

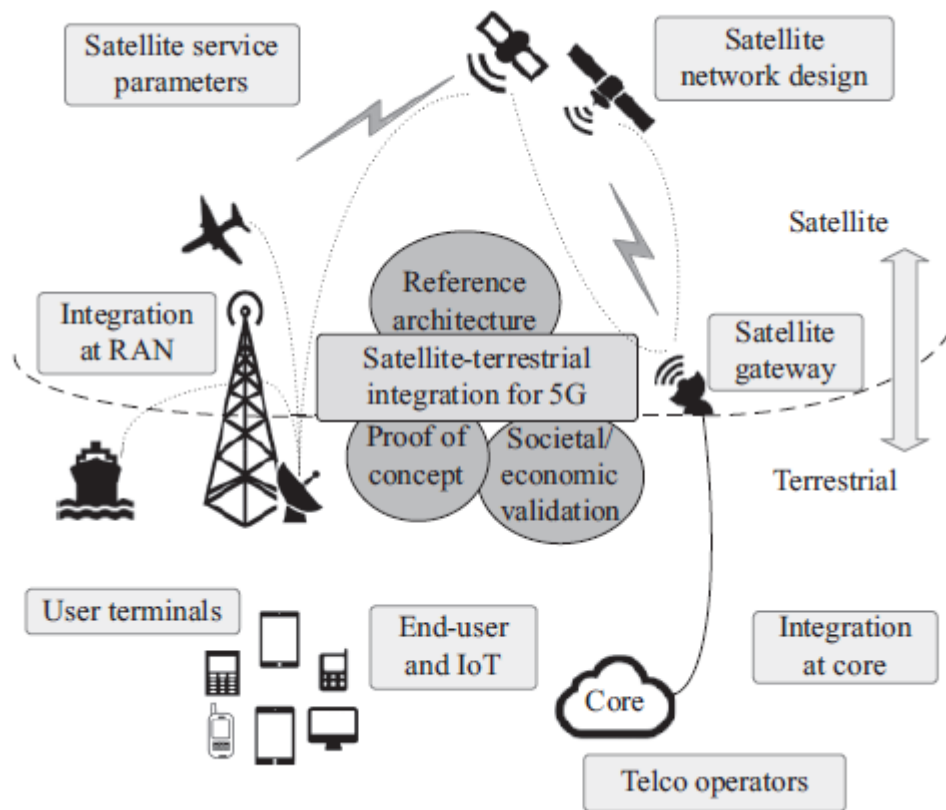


Рис. 1.1. Інтегрована супутниково-земна архітектура

Інтегрована екосистема супутниково-наземної мережі показана на рис. 1.1 з інтеграцією в RAN, а також у базовій мережі. Модель мережі передбачає архітектуру супутникової мережі, що складається із супутників, які підключаються до супутникового шлюзу та супутникових терміналів через асиметричні канали зв'язку. Наземна RAT може включати нове радіо 5G, Wi-Fi і LTE, а також радіотехнології, розроблені для зв'язку між кораблями або іншими бортами для перевезення пасажирів та між пристроями.

Інтегрована супутниково-земна архітектура вимагає цілісної оцінки з точки зору підтвердження концепції для різних сценаріїв. Ключові компоненти такої оцінки включають додавання супутникових параметрів до вимог 5G, нову

супутникову послугу та кінцевого користувача, який складається з кількох радіотерміналів. Суспільна, економічна та бізнес-валідація інтегрованої архітектури також дуже важлива. Інтеграція супутників із наземною системою є, мабуть, ключовою сферою, яка забезпечує багато переваг. Одним із таких є покращення QoE користувача шляхом інтелектуальної маршрутизації трафіку між системами доставки та кешування файлів великої ємності для подальшої наземної передачі. Це може бути посилено властивими можливостями багатоадресної/широкомовної передачі супутникових систем, тоді як затримка розповсюдження більше не є проблемою завдяки інтелектуальному кешуванню. Розвантаження трафіку з наземної системи для економії ресурсів цінного наземного спектру відкриває можливість покращити стійкість і безпеку за допомогою двох мереж. Можна виділити три основні варіанти використання для інтеграції супутникового рішення в 5G, а саме: транкінг і канал головного вузла, зворотний зв'язок і канал вежі, а також зв'язок у русі.

Супутники можуть забезпечити дуже високошвидкісне пряме підключення до віддалених/важкодоступних місць. Дуже високошвидкісне супутникове з'єднання, яке може досягати 1 Гбіт/с або більше, з GEO та/або негеостаціонарного супутника доповнить існуюче наземне з'єднання, щоб забезпечити:

- Високошвидкісний транкінг відео, IoT та інших даних до центрального сайту з подальшим наземним розповсюдженням на локальні стільникові мережі (3G/4G/5G), наприклад, сусідні села.
- Міжкластерний супутниковий зв'язок для віддаленої кластеризації.
- Міжкластерний супутниковий зв'язок для периферійних громад.
- Міжкластерний супутниковий зв'язок для переповнених громад.
- Віддалена система IoT із супутниковою інтеграцією.
- Супутник LEO забезпечує низьку затримку розвантаження контрольної площини.

## 1.2 Інтеграція супутникових і 5G-мереж

Вважається, що однією з головних проблем 5G є підвищені вимоги до транзитного зв'язку з дуже великою кількістю малих комірок. Отже, очевидне застосування супутникового зв'язку в архітектурі 5Gdelivery – це сегмент транзитного зв'язку мережі. Супутники високої пропускної здатності (HTS) можуть використовуватися тут, щоб доповнити наземне забезпечення та забезпечити зворотний зв'язок у районах, де це важко зробити наземним шляхом. HTS може забезпечити високошвидкісне підключення (включаючи багатоадресний вміст) для бездротових веж, точок доступу та хмари, як показано на рис. 1.2.

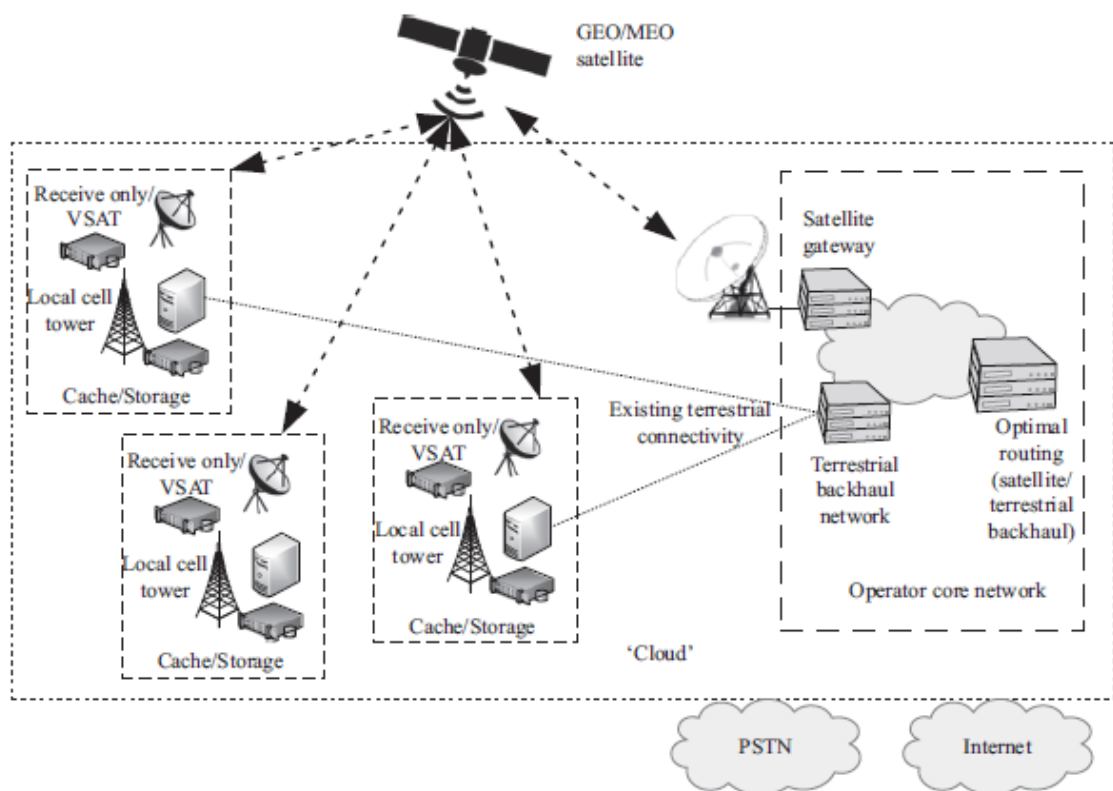


Рис. 1.2. Супутник для транспортування та подачі інформації

Загалом, дуже високошвидкісне супутникове з'єднання (до 1 Гбіт/с або більше) напряму до базових станцій із GEO та/або негеостаціонарного супутника доповнить існуюче наземне з'єднання, щоб забезпечити:

Підключення до окремих осередків із можливістю групової передачі одного й того самого вмісту (наприклад, відео, HD/UHD TV, а також невідеодані) у великій зоні покриття.

Ефективна передача агрегованого трафіку IoT на кілька сайтів.

Оновлення розваг із супутниковою інтеграцією для повітря (підключені літаки) і моря (підключені кораблі).

Вантажоперевезення та логістика.

Моніторинг вантажівок і зв'язок у подвійному режимі наземного та супутникового рішення.

Нові програми та випадки використання в 5G, такі як мобільна медицина та автономні транспортні засоби, вимагають підтримки дуже низької затримки, як правило, менше 1 мс, і дуже високої доступності, безпеки та надійності. Отже, дуже низька затримка в радіомережі є однією з цілей 5G. Досягнення низької затримки на рівні наскрізного зв'язку обмежено відсутністю фізичної можливості та неможливістю без переміщення функціональності на край мережі, у місці, розташованому поблизу кінцевої точки радіомережі 5G із дуже низькою затримкою. Отже, для того, щоб задовольнити вимоги щодо затримки, єдиною економічною альтернативою є надання доступної обчислювальної потужності на межі мережі та замикання наскрізної мережі для послуг із жорсткою затримкою. Послуги, для яких потрібен час затримки менше 1 мс, мають обслуговувати весь вміст із фізичного місця(клітини), дуже близького до пристрою користувача. Можливо, в основі кожної клітини, включно з багатьма маленькими клітинами, які, за прогнозами, є фундаментальними для задоволення вимог ущільнення. Щоб досягти короткого маршруту обслуговування, усі обов'язкові функції для надання послуг мають бути доступними на межі, таким чином роблячи пропускну спроможність і характеристики затримки за крайовим вузлом невідповідними для фактичної затримки доставки послуг. Затримка розповсюдження супутника GEO, що становить приблизно 270 мс (540 мс в обидві сторони), є прийнятним у деяких випадках використання 5G.

Супутникова мережа MEO і LEO зможе підтримувати більш чутливі до затримки програми. Затримка розповсюдження служби з'єднання також буде регулюватись відповідним розміром і топологією сузір'їв, динамічною конфігурацією клієнтських променів, а також мережею, стійкою до затримок. Тим часом, затримкою обробки можна керувати за допомогою адекватного розподілу виконання віртуальних функцій між космічними та наземними центрами обробки даних.

### **1.3 Останні досягнення у супутниковому зв'язку 5G**

Тепер до обговорення останніх досягнень супутниковому зв'язку 5G. Останні досягнення включають поточні проекти супутниково-земної інтеграції, наземного та супутникового спектру, угруповання мега-LEO, бортової обробки, технології GaN, SDN, багатоадресної передачі та інтегрованої сигналізації.

Проекти супутниково-наземної інтеграції, що фінансуються Європейською комісією в рамках програми «Горизонт 2022» (H2022), включають наступне:

Супутникові та наземні мережі для 5G

Супутникові та наземні мережі для 5G (SAT5G) перенесуть супутниковий зв'язок у 5G, визначаючи оптимальні супутникові рішення для зворотного зв'язку та розвантаження трафіку.

Він досліджуватиме, розроблятиме та перевірятиме ключові технології 5G, щоб максимально використати можливості супутникового зв'язку та пом'якшити його властиві обмеження, такі як затримка. SAT5G визначить нові бізнес-моделі та економічно життєздатне операційне співробітництво, яке об'єднає супутникові та наземні зацікавлені сторони у взаємовигідній ситуації.

Наземно-супутникова транзитна мережа зі спільним доступом за допомогою інтелектуальних антен (SANSA)

Метою проекту SANSA є підвищення продуктивності мобільних бездротових транспортних мереж з точки зору пропускну здатності та стійкості, забезпечуючи при цьому ефективне використання спектру. Проект SANSA

пропонує гібридну наземно-супутникову транзитну мережу з ефективним використанням спектру, що самоорганізується, що базується на трьох ключових принципах:

Повна інтеграція супутникового сегмента в наземні мережі транзитного зв'язку.

Наземна бездротова мережа, здатна змінювати свою топологію відповідно до потреб трафіку.

Спільний спектр між супутниковим і наземним сегментами.

Очікується, що поєднання цих принципів призведе до створення гнучкого рішення, яке зможе ефективно маршрутизувати мобільний трафік з точки зору пропускної здатності та енергоефективності, одночасно забезпечуючи стійкість до збоїв у з'єднанні чи перевантаження та просте розгортання в сільській місцевості.

Віртуалізовані гібридні супутниково-наземні системи для стійких і гнучких мереж майбутнього (VITAL)

Проект VITAL спрямований на поєднання наземних і супутникових мереж шляхом реалізації двох ключових інноваційних напрямків: впровадження NFV у супутниковий домен і забезпечення об'єднаного управління ресурсами на основі SDN у гібридних супутниково-наземних мережах зв'язку. Увімкнення об'єднаного керування ресурсами на основі SDN прокладає шлях для уніфікованої площини керування, яка дозволить операторам ефективно керувати та оптимізувати роботу гібридних супутникових комунікаційно-наземних мереж.

Поговоримо про наземний і супутниковий спектр в 5G

Використання більшої смуги пропускання в діапазоні mmWave є фундаментальним для задоволення вимог наземних мереж 5G. У зв'язку з тим, що частина мм хвильового діапазону в даний час розподілена на основі для ряду інших додатків, таких як фіксовані супутникові служби (FSS), Федеральна комісія зв'язку (FCC) хоче створити більш гнучку структуру для використання електромагнітного спектру вище. 24 ГГц.

Нещодавно дані польових випробувань були використані для оцінки потенційних перешкод між наземним мобільним широкосмуговим зв'язком (5G) і системами FSS, які спільно використовують діапазон 28 ГГц.

Метою роботи було створення правил обслуговування для використання чотирьох діапазонів спектру, які будуть спільно використовуватися наземними та супутниковими системами. Діапазонами є 28 ГГц (27,5–28,35 ГГц), 37 ГГц (37–38,6 ГГц) і 39 ГГц (38,6–40 ГГц), а також неліцензований діапазон 64–71 ГГц. Ці високі частоти традиційно були для супутників або фіксованих мікрохвиль. Вимірювання польових випробувань показало, що перешкоди від існуючої передавальної земної станції FSS мережам 5G можна контролювати шляхом обмеження щільності потоку потужності на висоті 10 м над рівнем землі до  $-77,6$  дБм/м<sup>2</sup>/МГц.

Доцільність співіснування між FSS і наземною мережею mmWave також була досліджена шляхом оцінки перешкод для рівня шуму на FSS і різних розгортаннях і конфігураціях наземних базових станцій. Розглянуті конфігурації включають багаторівневий розподіл базових станцій і формування радіочастотного променя на передавачах. Було показано, що використовуючи характеристики сценарію mmWave, такі як велика антенна решітка та високі втрати на трасі, можна зробити можливим співіснування наземної базової станції themmWave та FSS в одній зоні.

Крім того, було встановлено, що такі параметри, як кут підйому FSS, щільність базових станцій і захисна відстань, є життєвоважливими при розгортанні мережі, щоб гарантувати функціональність FSS.

Тепер щодо Mega-LEO сузір'я

HTS забезпечують підключення великої ємності за допомогою технології багатоточкового променя та повторного використання частоти, що дозволить знизити вартість експлуатації технології. Інтеграція GEO HTS з наземними системами забезпечить глобальне покриття великої ємності. Однак це супроводжується проблемою великої затримки при поширенні. Сузір'я Mega-LEO, які є системами LEO із сотень супутників, можуть обійти цю проблему, і



нещодавно їй привернули значну увагу. Угрупування Mega-LEO можна використовувати для надання ширококутових послуг LTE в областях, які не підключені до наземної інфраструктури, як продемонстрували автори, проаналізувавши вплив затримки поширення та доплерівського зсуву в системах LEO на процедури рівнів LTE PHY і MAC. Розширення аналізу з акцентом на дизайн сигналу, довільний доступ і гібридну процедуру автоматичного повторного запиту та вплив доплерівського зсуву в системах LEO на форму хвилі можна компенсувати точною оцінкою місцезнаходження.

Крім того, вплив затримки розповсюдження на процедуру довільного доступу можна обмежити збільшенням часу відповіді довільного доступу. Табл. 1.1 показує деякі заплановані угруповання мега-LEO та їхні характеристики.

Таблиця 1.1

Заплановані угруповання мега-LEO та їхні характеристики

Сузір'я	LeoSat	SpaseX	OneWeb
Кількість супутників	78-108	4000	640+
Висота (км)	1400	1100	1200
Затримка (мс)	50	20-30	20-30
Швидкість користувача	1.6 Гбіт/с	1 Гбіт/с	50 Мбіт/с
Вартість (\$)	3,5 В	10 В	2.3 В
Особливості	Підходить для застосування на підприємствах, Мобільність, Зворотній зв'язок	Ширококутовий зв'язок, Зворотній зв'язок	Ширококутовий зв'язок, Мобільність

Тепер обговоримо обробку на бортових системах

У бортових системах цифрової обробки отримані сигнали демодулюються та декодуються до цифрового пакетного або бітового рівня. Це забезпечує підвищену гнучкість системи з точки зору маршрутизації сигналу та інформації, підключення до мережевої мережі та управління ресурсами.

Інші переваги включають вищу пропускну здатність користувача та системи та вищу ефективність зв'язку, які досягаються за рахунок попередження спотворень і пом'якшення перешкод, використання нової форми сигналу та повного дуплексу. Таким чином, бортові системи з цифровою обробкою – це майбутнє супутникового зв'язку, і це стимулюється наступним:

- Збільшення терміну служби супутника. Протягом цього періоду можуть знадобитися нові характеристики доступу або може виникнути потреба підтримувати нову топологію підключення служби/користувача.
- Збільшення гнучкості корисного навантаження з точки зору пропускну здатності та гнучкості конфігурації частоти на рівні корисного навантаження.
- Розширена конфігурація та можливість реконфігурації корисного навантаження для підтримки крос-смугових інтертранспондерів та/або конфігурації між променями в зоні покриття високого променя.

Незважаючи на це, багатьом додаткам потрібна лише звичайна передача з пропускну здатністю за методикою “гнутої труби”, оскільки це залишається найефективнішим способом підтримки таких послуг, як телебачення. Розвиток технологій і тенденції в постачальниках послуг означають збільшення вмісту, який персоналізується та доставляється в режимі одноадресної або багатоадресної передачі, а не традиційної трансляції. Отже, бортова обробка даних відіграватиме важливу роль у майбутньому, оскільки все більше послуг і контенту надаватимуться через з'єднання Інтернет-протоколу. Тим часом гібридне корисне навантаження, в якому співіснують технології зігнутої труби та бортові технології обробки, наприклад корисне навантаження Intelsat 14, відображає те, як міг би

виглядати супутник найближчого майбутнього. Таке гібридне розгортання очікується протягом багатьох років, поки кількість космічних маршрутизаторів не зросте, а вартість технології знизиться.

- Нові потенційні рішення для наступного покоління бортових систем обробки повинні враховувати наступне:
  - зменшення габаритів, ваги та енергоспоживання на рівні корисного навантаження;
  - покращення реконфігурації та гнучкості корисного навантаження;
  - покращення продуктивності висхідної та низхідної лінії зв'язку.

## 2 АНАЛІЗ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ПРИДАТНІ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ В НАЙБЛИЖЧОМУ МАЙБУТНЬОМУ

### 2.1 Застосування супутників із підтримкою SDN для супутниково-земної інтеграції

До ключових характеристик супутникового зв'язку відносять широкомасштабне покриття, підтримка широкомовної/багатоадресної передачі та висока доступність, разом із значною кількістю нових супутникових можливостей, що надходять в мережу, передбачають нові можливості для послуг супутникового зв'язку, щоб стати невід'ємною частиною майбутнього 5G системи. Розглянемо реалізацію наскрізного (E2E) проектування трафіку (TE) у комбінованій наземно-супутниковій мережі, що включає технології програмно-визначених мереж (SDN). Основна увага приділяється сценарію мобільної транзитної мережі, де супутниковий компонент використовується для доповнення наземної інфраструктури таким чином, що шляхи E2E як через супутникові, так і через наземні канали зв'язку можуть бути централізовано обчислені та динамічно змінюватися на рівні потоку деталізації перед перевантаженням зв'язку чи збоєм. Автор опише архітектуру супутникової наземної сегментної системи з підтримкою SDN та надасть ілюстративні робочі процеси TE. Крім того, на основі запропонованої архітектурної структури розроблено програму TE на основі SDN для гібридних супутниково-наземних мереж транзитного зв'язку та оцінено її продуктивність у різних сценарних умовах.

Роль, яку може відігравати супутниковий зв'язок у майбутній екосистемі 5G, переглядається [1-3]. Індустрія супутникового зв'язку наполягає на покращенні супутниково-земної співпраці в рамках мобільних мереж 2020 року [4-6]. Примітно, що вимога до систем наступного покоління 3GPP, щоб вони могли надавати послуги з використанням супутникового доступу, була включена в нормативні вимоги етапу 1 [7], і зараз триває дослідження щодо підтримки

неземних мереж (тобто супутниковий доступ та інші типи мереж доступу на основі використання бортових транспортних засобів для передачі) в рамках специфікацій 5G New Radio [8] з метою досягнення операційної інтеграції вищого рівня та високого ступеня спільності радіо інтерфейсу. Дійсно, згідно з [8], очікується, що наземні мережі доступу стануть невід'ємною частиною розгортання послуг 5G шляхом:

- Увімкнення повсюдного обслуговування 5G для терміналів [особливо Інтернету речей (IoT)/комунікацій машинного типу, громадської безпеки/важливих комунікацій] шляхом розширення охоплення наземних мереж 5G до областей, які не можуть бути оптимально покриті наземною мережею 5G.
- Забезпечення надійності та стійкості послуг 5G завдяки зниженню вразливості повітряно-космічних транспортних засобів до фізичних атак і стихійних лих. Це особливо цікаво для громадської безпеки або систем залізничного зв'язку.
- Увімкнення підключення елементів мережі радіодоступу 5G (5G-RAN), щоб забезпечити повсюдне розгортання наземної мережі 5G.
- Забезпечення зв'язку та надання послуг 5G до обладнання користувача (UE) на борту транспортних засобів (наприклад, пасажирів повітряних польотів, безпілотних літальних апаратів (UAS)/дронів тощо).
- Забезпечення підключення та надання послуг 5G до UE на борту інших рухомих платформ, таких як судна та поїзди.
- Забезпечення ефективної багатоадресної/широкомовної доставки таких послуг, як аудіо/відеоконтент, групові комунікації, послуги трансляції Інтернету речей, завантаження програмного забезпечення (наприклад, у підключені автомобілі) та екстрені повідомлення.
- Забезпечення гнучкості в TE послуг 5G між наземними та неземними мережами.

На додачу до досягнення високого рівня спільності радіоінтерфейсу та операційної інтеграції вищого рівня з наземним доступом 5G, розгортання та експлуатація мереж, які поєднують наземні та супутникові компоненти передачі, також очікується, що виграють від впровадження технологій захисту мережі, такі як SDN і віртуалізація мережевих функцій (NFV) [9-12] в супутниковій системі. Дійсно, протягом останнього десятиліття мережеве співтовариство стало свідком зміни парадигми в бік програмного забезпечення комунікаційних мереж у пошуках покращеної гнучкості та зрештою, зниження витрат на розгортання та роботу мереж. У цьому контексті еволюція супутникових наземних сегментних систем (наприклад, супутникових шлюзів і терміналів) від сьогоднішніх досить закритих рішень до більш відкритих архітектур на основі технологій SDN і NFV постає як необхідний крок не тільки для того, щоб перенести в супутникові переваги, пов'язані з досягнення в технологіях програмного забезпечення мережі, які консолідуються в ландшафті 5G, а також значно полегшують бездоганну інтеграцію та роботу комбінованих супутникових і наземних мереж. Зокрема, очікується, що реалізація повної мережевої концепції E2E, де вся поведінка супутниково-наземної мережі може бути запрограмована узгодженим та сумісним способом, виграє від впровадження в супутникових мережах моделей абстракції, протоколів та інтерфейсів прикладного програмування (API), що сумісні з основними архітектурами та технологіями SDN, які застосовуються в 5G у пошуках галузевої конвергенції навколо нейтральних пристроїв і постачальників рішень SDN.

## **2.2 Основи архітектур SDN**

У цьому контексті розглядається реалізація E2E TE у комбінованій наземно-супутниковій мережі, що включає технології SDN. З цією метою спочатку обговорюються основи для супутникових мереж із підтримкою SDN та окреслення потенційної архітектури на основі SDN для супутникових наземних сегментних систем. Далі представлено інтеграційний підхід до реалізації E2E TE. Основна увага приділяється сценарію мобільної транзитної мережі, де

супутниковий компонент використовується для доповнення наземної інфраструктури таким чином, що шляхи E2E як через супутникові, так і через наземні канали зв'язку можуть бути централізовано обчислені та динамічно змінюватися на рівні потоку деталізації перед перевантаженням каналу і у випадках відмови.

Далі буде наведено ілюстративні робочі процеси для E2E TE. Виходячи з цього, наведено формулювання ілюстративної програми TE на основі SDN, яка використовує комбінацію функцій керування та критеріїв, включаючи обчислення шляху E2E, резервування ресурсів супутникової пропускної здатності, критерії розподілу залежно від природи трафіку, контроль доступу та особливості контролю швидкості та критерії максимізації корисності мережі. Нарешті представлено аналіз продуктивності для оцінки поведінки запропонованої програми TE на основі SDN за різноманітних сценаріїв, включаючи однорідні та неоднорідні ситуації навантаження, збої наземного зв'язку на деяких базових станціях (BS) і розгортання ряду транспортбельних базових станцій (TBS), які покладаються виключно на супутникову потужність для транспортування.

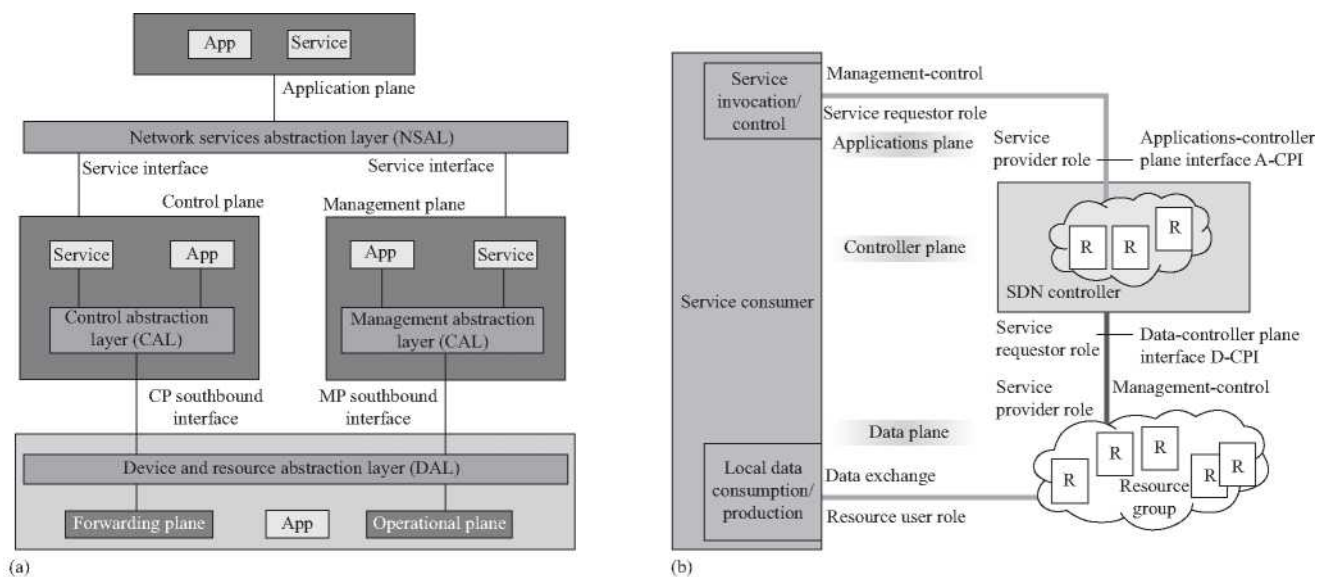


Рис. 2.1. (a) IETF RFC 7426 і (b) архітектурні моделі ONF SDN

Загальні принципи та еталонні архітектури SDN були визначені Open Networking Foundation (ONF) та Internet Engineering Task Force (IETF) у [13,14] відповідно. Обидві архітектурні моделі SDN проілюстровано на рисунку 2.1. Залишаючи осторонь деякі відмінності в термінології та орієнтації, обидві архітектури відображають ключові принципи SDN:

- (1) відокремлення ресурсів площини даних (наприклад, функції пересилання даних) від функцій контролю та управління,
- (2) централізація функцій управління та контролю і
- (3) програмованість мережевих функціональних можливостей за допомогою нейтральних щодо пристроїв і постачальників абстракцій і API.

У той час як опис моделі IETF більше зосереджений на мережевих пристроях і рівнях абстракції контролю та управління, модель ONF специфікується навколо так званого контролера SDN, який є основною функціональною сутністю архітектури SDN. Контролер SDN надає послуги та ресурси клієнтам через інтерфейси площини контролера програми (A-CPI) і споживає базові служби та ресурси через інтерфейси площини контролера даних (D-CPI). A-CPI та D-CPI, відповідно, є еквівалентами південного інтерфейсу площини керування/площини керування (CP/MP SBI) та інтерфейсів обслуговування в моделі IETF. Сервісні інтерфейси також зазвичай називають північними інтерфейсами (NBI).

Спеціалізована архітектура SDN для транспортних мереж розробляється Робочою групою з архітектури трафіку та сигналізації в рамках IETF, яка відповідає за визначення багатопроTOCOLЬНОЇ комутації міток (MPLS) і узагальненої архітектури та протоколів MPLS (GMPLS) TE. Така архітектура SDN, названа абстракцією та керуванням транспортними мережами (ACTN), описує структуру керування для роботи мережі TE (наприклад, мережі MPLS-TE або транспортної мережі рівня 1) для забезпечення підключення та послуг віртуальної мережі для клієнтів. мережі TE. Послуги, які надає ACTN, можна



налаштувати відповідно до вимог (таких як схеми трафіку, якість і надійність) додатків, розміщених клієнтами. Ілюстрація архітектури ACTN наведена на рисунку 2.2. Архітектура ACTN добре узгоджується з раніше представленими принципами архітектури ONF і IETF SDN, навіть якщо вона представлена як трирівнева еталонна модель. Важливо, що архітектура ACTN допускає ієрархію та рекурсію не лише для контролерів SDN, але й для традиційно контрольованих доменів, які використовують площину керування.

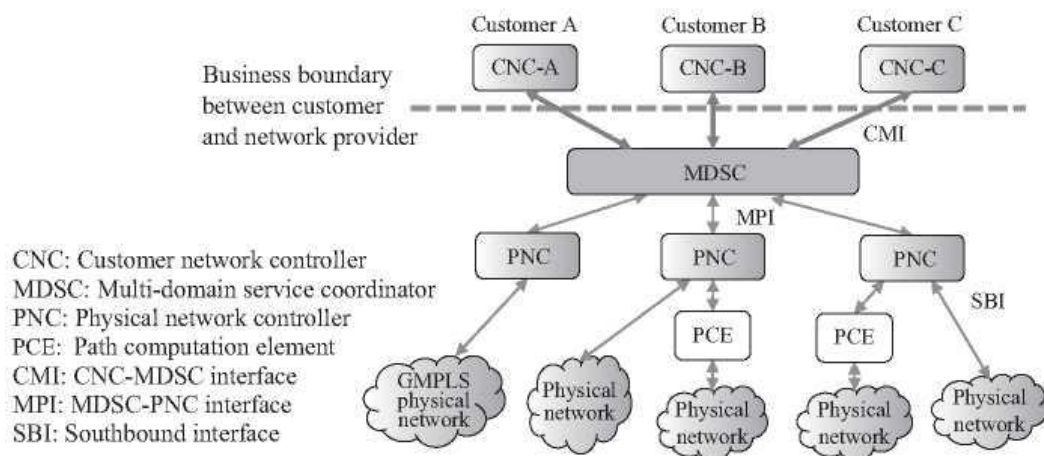


Рис. 2.2. Архітектура IETF абстракції та керування транспортними мережами (ACTN)

Що стосується моделей даних, протоколів і API, протокол OpenFlow (OF), стандартизований ONF, ймовірно, є найпопулярнішим протоколом, який використовується в південному інтерфейсі (SBI) архітектур SDN. Специфікація OF [15] наразі визначає два елементи:

- (1) абстрактну модель шляху даних комутатора для обробки пакетів (тобто очікувану поведінку комутатора)
- (2) протокол для зв'язку між комутатором і контролером SDN для програмування поведінки площини даних перемикача.

У той час як поточний обсяг OF — це в основному управління потоком, ONF прагне розширити сферу контролю SDN, щоб підтримувати широкий спектр апаратних платформ шляхів даних, включаючи повністю програмовані

комутатори пакетів (тобто комутатори з відсутність вбудованої поведінки протоколу) [16]. Іншою важливою ініціативою в рамках ONF є Проект інформаційного моделювання (ONF-IMP), який має намір забезпечити загальну основу для визначення термінології та нормалізації, що лежить в основі розробки SDN API, щоб сприяти конвергенції визначень інтерфейсу на основі моделі.

З цією метою ONF-IMP створив так звану загальну інформаційну модель ONF (ONF-CIM) [17], яка включає всі артефакти (об'єкти, атрибути та зв'язки), необхідні для опису домену для додатків. розробляється. ONF-CIM містить основну модель (ONF Core Information Model [18]), яка забезпечує незалежне від технології представлення ресурсів пересилання мережі з точки зору управління та контролю, а також різні конкретні технології та доповнення рівня (наприклад, OTN/OCH/ODU), ETH, MPLS-TP). ONF-CIM може постійно розширюватися та вдосконалюватися з часом, щоб додавати нові програми, можливості чи технології, або вдосконалювати його в міру отримання нових ідей. Спираючись на ONF-CIM, проект відкритого транспорту в рамках ONF стосується можливостей керування на основі стандартів SDN і OF для транспортних технологій різних типів, включаючи оптичний і бездротовий транспорт. Робота включає виявлення та вирішення різних випадків використання, визначення застосування архітектури SDN та моделювання інформації до транспортних мереж, а також визначення стандартних інтерфейсів SDN для транспортних мереж, включаючи розширення протоколу OF та API контролера транспорту. У нашому обговоренні слід розглянути три відповідні результати проекту Open Transport: ONF TR-522 [19], який описує застосування загальної архітектури SDN [13] і ONF-CIM до транспортних мереж; ONF TR-527 [20], який розробляє функціональні вимоги для визначення транспортного API (T-API); і TR-532 [21], який надає технологічне розширення базової інформаційної моделі ONF [18] для використання архітектури SDN у бездротових транспортних мережах. Все ще в рамках ONF, варто також згадати проект NBIs, який розробляє конкретні вимоги, архітектуру та робочий код для NBI, щоб знизити бар'єри для розробки додатків SDN. На даний момент випущено лише документ ONF TR-523 [22], який містить

принципи визначення інтерфейсів на основі способів його застосування. У домені IETF YANG [23] стає мовою моделювання даних. YANG можна використовувати для моделювання як конфігурації, так і робочого стану; він не залежить від постачальника та підтримує розширювані API для контролю та керування елементами. Дійсно, моделі даних YANG [23] разом із відповідним протоколом обміну повідомленнями і механізмами кодування вже були прийняті та просуваються декількома галузевими ініціативами відкритого управління та контролю (M&C) (наприклад, OpenConfig). Моделі даних YANG також розглядаються як рішення для структури ACTN [26]. Для отримання додаткової інформації про архітектуру та технології SDN разом із ключовими розробками в рамках ONF, IETF та інших організацій із розробки стандартів і промислових форумів зацікавлений читач може звернутися до [27,28].

### **2.3 Архітектура супутникової мережі**

ETSI створила незалежну від технології еталонну структуру для комунікаційних систем широкосмугового супутникового мультимедіа (BSM) [29]. Архітектура системи BSM задумана як всеохоплююча архітектура, що складається із загальних компонентів інтерактивної мережевої мережі зв'язку: супутниковий термінал користувача (ST), шлюз ST, супутникове завантаження користувачів, центр керування мережею (NMC) і центр керування мережею (NCC). Важливо, що архітектурна система BSM не обмежується будь-яким конкретним супутниковим радіоінтерфейсом (наприклад, DVB-S2/RCS2), а призначена для підтримки різноманітних протоколів радіоінтерфейсу. Так, загальна архітектурна система ETSI BSM застосовна до різних конфігурацій, які супутникова мережа може реалізовувати з точки зору топології (зірка, сітка) і роботи корисного завантаження (прозора та регенеративна) [30].

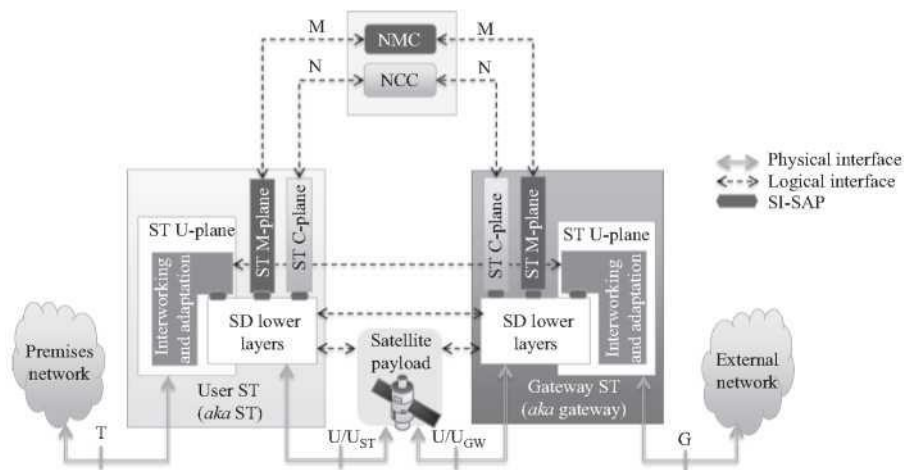


Рис. 2.3. Архітектура системи ETSI BSM: еталонні інтерфейси для площин U/C/M

На рисунку 2.3 зображено структуру ETSI BSM з точки зору еталонних інтерфейсів для площі користувача (площа U) і для контролю/управління площею (площина C і M-площа). Еталонні інтерфейси виділяються на фізичні та логічні інтерфейси, першими застосовуються фізичні об'єднання між обладнанням, а другий – логічні асоціації між одноранговими об'єктами протоколу. Як показано на рисунку 2.3, одним із центральних принципів архітектури системи BSM є логічне відокремлення незалежних від супутника (SI) рівнів (наприклад, рівнів Ethernet/IP разом із функціями взаємодії та адаптації, необхідними для з'єднання із зовнішніми мережами) від рівнів, залежних від супутника (SD), взаємодія, яка формалізована визначенням інтерфейсу точки доступу до служби SI (SI-SAP) [31]. Зосереджуючись на U-площині (так званій площині даних), чотири фізичні інтерфейси визначені в точках з'єднання мережі між приміщенням та користувачем ST (T-інтерфейс), користувачем ST і супутниковим навантаженням (інтерфейс U/UST), супутниковим корисним навантаженням і шлюзом. ST (інтерфейс U/UGW) і шлюз ST і зовнішня мережа (інтерфейс G). Мітка радіоінтерфейсу U означає, що ST і шлюз ST мають один радіоінтерфейс для зв'язку між собою через супутникове корисне навантаження, тоді як UST і UGW відносяться до випадку, коли радіоінтерфейс із двома сторонами. З іншого боку, для U-площини визначено три логічні інтерфейси, що виключаються

одноранговими взаємодіями різних рівнів протоколів радіоінтерфейсу. Один логічний інтерфейс охоплює взаємодію між рівнями протоколу SI з обох сторінок, що є функцією взаємодії та адаптації. Інші два логічні інтерфейси підходять до нижніх рівнів SD, один для взаємодії з корисним навантаженням супутника, а інший для однорангового ST. Межа між цими двома логічними інтерфейсами залежить від підтримуваних можливостей корисного навантаження супутника. Щодо С-площини та М-площини ідентифікуються два логічні інтерфейси з іменами N і M. Зокрема, інтерфейс N є інтерфейсом керування між ST користувача/шлюзу та NCC, який є функціональним об'єктом, який забезпечує керування мережею BSM у реальному часі (наприклад, керування сеансом/з'єднанням, маршрутизація, контроль доступу терміналів до супутника –полегшені ресурси тощо). І інтерфейс M є інтерфейсом керування між ST і NMC, який є функціональним об'єктом, відповідальним за керування всіма системними елементами в мережі BSM (наприклад, управління несправностями, конфігурацією, продуктивністю, обліком і безпекою). Слід зазначити, що наразі інтерфейси N і M розглядаються як внутрішні інтерфейси в системі BSM, які не підлягають стандартизації чи гармонізації між постачальниками. Однак зараз розробляємо це функціональне розділення, встановлене в еталонній моделі BSM, як основоположну точку для введення концепцій і технологій SDN у систему BSM.

Стосовно можливостей обслуговування BSM і підтримки QoS через супутникові лінії зв'язку, архітектура системи BSM визначає несучі послуги BSM. Послуга носія BSM включає в себе всі аспекти, щоб забезпечити надання послуги транспортування даних U-площини між ST користувача/шлюзу, включно з характеристиками QoS та іншими властивостями, такими як без з'єднання або з орієнтацією на з'єднання, однонаправленим або двонаправленим, симетричним або асиметричним та точка-точка/багатоадресна/широкомовна природа послуги носія. Служби-носії BSM визначаються на рівні інтерфейсу SI-SAP і використовують послуги, що надаються основними службами-носіями (що залежить від конкретної реалізації нижніх рівнів SD для керування доступом до

каналу та середовища). Таким же чином служби вищого рівня (наприклад, IP-з'єднання через супутникову мережу) побудовані на службах-носіях BSM і можуть бути зіставлені з різними службами-носіями BSM залежно від конкретних вимог до послуг вищого рівня. Абстрактне представлення доступних служб-носіїв BSM на рівні SI-SAP виконується за допомогою міток, які називаються ідентифікаторами черги (QID). Властивості QoS, пов'язані з заданим QID, визначаються параметрами QoS, і кожен QID відображається на відповідних можливостях передачі нижнього рівня, щоб реалізувати цей QoS. QID визначені більш детально в специфікації SI-SAP [31] і рекомендаціях SI-SAP [32]. Модель QoS, створена для систем BSM, і класи трафіку, що використовуються для опису QoS, управління продуктивністю та розподілу ресурсів, детально визначені в [33,34] відповідно.

Базуючись на раніше описаних аспектах архітектури системи BSM (тобто функціональні компоненти, еталонні інтерфейси, послуги-носії/QID і модель QoS), рисунку 2.4 ілюструє рішення для прийняття архітектури SDN у супутниковій мережі. Це рішення базується на впровадженні контролера SDN, як частини функціональної архітектури супутникової мережі для керування службами з'єднання між опорними точками T і G. . У випадку служб з комутацією пакетів (наприклад, служб з'єднання IP та Ethernet) найточнішу деталізацію обробки переадресації QoS зазвичай називають потоком, який можна визначити як послідовність пакетів між джерелом і пунктом призначення, призначених для отримувати ідентичні політики обслуговування під час просування через U-площину.

Набір фільтрів пакетів, який на рисунку 2.4. називається шаблоном потоку трафіку, він повинен використовуватися для ідентифікації окремого потоку даних, що належить до певної програми (наприклад, фільтри пакетів для потоків IP зазвичай складаються з п'яти кортежів IP з IP-адресою джерела, IP-адресою призначення адресу, порт джерела, порт призначення та тип протоколу). Як показано на рисунку 2.4, контролер SDN безпосередньо керує послугами SI,

такими як QoS рівня IP/Ethernet, і опосередковано керує послугами SD через функції NCC/NMC. Відповідно, тоді потрібні такі інтерфейси:

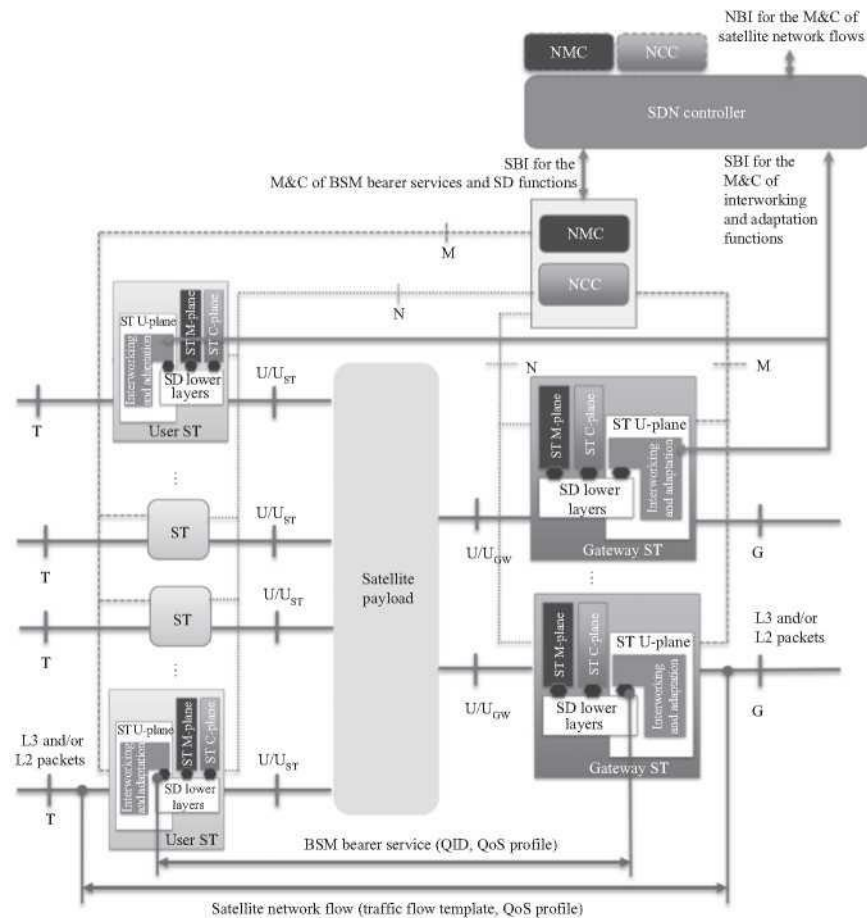


Рис. 2.4. Архітектура супутникової мережі на основі SDN

- SBI для M&C функцій взаємодії та адаптації в ST шлюзу та, можливо, також у ST користувача. Цей інтерфейс не залежить від супутника, тому моделі SDN та інтерфейси, що використовуються в широкому мережевому домені, можуть бути прийняті, наприклад моделі OF і YANG.
- SBI для M&C несучих послуг BSM і, можливо, також деяких можливостей на нижніх рівнях SD (супутникові ресурси, такі як частотний план, схеми модуляції та кодування або інші властивості супутника) через взаємодію зі старою супутниковою мережею Функції NCC/NMC. Цей інтерфейс, можливо, повинен враховувати аспекти, що стосуються супутників, тому необхідно деяке розширення та адаптація існуючих моделей та інтерфейсів SDN. Потенційними кандидатами базових моделей даних SDN та інтерфейсів для реалізації цього

інтерфейсу є OF та Microwave Information Model [21]. У випадку, якщо функції NCC/NMC можуть бути реалізовані як мережеві програми поверх контролера SDN, інше потенційне рішення для цього інтерфейсу може базуватися на розширенні інтерфейсу ETSI SI-SAP для реалізації N і Інтерфейси M, які безпосередньо служать SBI з точки зору контролера SDN.

- NBI для M&C потоків супутникової мережі за допомогою мережевих додатків, що працюють поверх контролера SDN або від зовнішніх контролерів у домені керування верхнього рівня. Потенційними кандидатами на моделі даних SDN та інтерфейси для реалізації цього інтерфейсу є OF, ONF Transport API [20] і моделі YANG, визначені для архітектури ACTN.

## 2.4 Можливі моделі даних та інтерфейси SDN

**ETSI BSM SI-SAP.** Інтерфейс SI-SAP забезпечує функціональний поділ між рівнями SD і SI. Інтерфейс SI-SAP наразі визначений у термінах примітивів, якими обмінюються рівні SD і SI, відповідно до моделі стеку протоколів ISO/OSI. Існуюча специфікація [35] визначає примітиви для підтримки функцій U-plane та C-plane. Більш конкретно, послуги C-plane, що надаються інтерфейсом SI-SAP, це (1) служби входу/виходу з системи; (2) Сервіс конфігурації рівня SI, щоб забезпечити рівень SI необхідною інформацією для налаштування, наприклад, план адресації та різні функції вищих рівнів протоколу, такі як стиснення заголовка; (3) служба визначення адреси, яка використовується для виконання відображення адрес між рівнями SI та SD; (4) служба резервування ресурсів, яка використовується для розподілу ресурсів і загального управління QoS; і (5) послуги прийому та передачі групи багатоадресної адреси, викликані для побудови груп багатоадресної передачі та отримання бажаних потоків даних багатоадресної передачі.



SI-SAP може бути розгорнуто як зовнішній інтерфейс, як розглянуто в [35]. Відповідно до такого підходу, нижні рівні SD і керуючий об'єкт можуть працювати в різних місцях і бути з'єднані між собою технологією протоколу «точка-точка» (наприклад, Ethernet). Таким чином, службові примітиви інтерфейсу SI-SAP визначаються як конкретні повідомлення, що транспортуються за допомогою технології, реалізованої протоколом «точка-точка». Формати повідомлень і параметри інкапсуляції протоколів обговорюються в [35]. Додаткову інформацію про використання інтерфейсу SI-SAP можна знайти в [32].

Таким чином, BSM SI-SAP є явним кандидатом на впровадження SBI для M&C служб носіїв BSM і, можливо, також деяких можливостей на нижніх рівнях SD. Однак з цією метою поточні специфікації слід переглянути та розширити, оскільки вони наразі не призначені для керування фізичними радіоасpekтами супутникової лінії зв'язку (наприклад, вибір схеми модуляції та кодування) і мають обмежені можливості моніторингу та рівня управління.

**ONF OpenFlow.** OF принципово надає рішення для керування потоком, дозволяючи детально контролювати поведінку пересилання на рівні пакетів вузла комутатора/маршрутизатора. Специфікація OF [15] наразі визначає два елементи: (1) абстрактну модель шляху даних комутатора для обробки пакетів (тобто очікувану поведінку комутатора) і (2) протокол для зв'язку між комутатором і контролером, щоб увімкнути контролер для програмування поведінки площини даних комутатора. Специфікація OF містить підтримку ряду широко використовуваних протоколів площини даних від рівня 2 до рівня 4, з класифікацією пакетів, що виконується за допомогою таблиць збігів без стану та операцій обробки пакетів (називаються діями або інструкціями), починаючи від модифікації заголовка, вимірювання, QoS, пакету реплікація (наприклад, для реалізації багатоадресної передачі або агрегації каналів) та інкапсуляція/декапсуляція пакетів. Специфікація також передбачає кілька артефактів для збору статистики, яку можна отримати за запитом або за

допомогою сповіщень. Додатковим протоколом до протоколу OF є OF-CONFIG, також стандартизований ONF. OF-CONFIG додає підтримку конфігурації та керування комутаторами OF. OF-CONFIG забезпечує налаштування різних параметрів комутатора, які не обробляються протоколом OF.

Однак поточна специфікація OF має дуже обмежену підтримку для роботи з аспектами фізичного рівня портів комутатора. Поки що специфікація OF представила лише набір властивостей портів для додавання підтримки оптичних портів. Щодо підтримки бездротових портів, єдиним міркуванням було визначення процесу надсилання пакету через той самий порт, через який його було отримано, поведінка, яка не була чітко визначена в попередніх версіях специфікації та типова для бездротового зв'язку. Таким чином, у поточній специфікації OF немає практичної підтримки для конфігурації та моніторингу бездротових каналів/портів.

Відповідно, у супутниковій мережі на основі SDN OF є очевидним кандидатом для внутрішнього використання для керування функціями комутації в межах шлюзів і ST. Примітно, що OF також можна використовувати як зовнішній інтерфейс для надання певного контролю для управління потоком супутникової мережі та таким чином забезпечити функції керування, необхідні для реалізації E2E TE. Слід зазначити, що надання доступу до інтерфейсу OF супутниковою мережею також було запропоновано в контексті реалізації рішень оператора віртуальної мережі (VNO) [36], у якому VNO надається інтерфейс для контролю та керування ресурси супутникового сегмента, орендовані в оператора супутникової мережі, ніби він програмує перемикач OF. Загалом, OF є розширюваним протоколом, який забезпечує програмістам SDN механізми для визначення додаткових елементів протоколу (наприклад, нових полів відповідності, дій, властивостей порту) для вирішення нових мережевих технологій і поведінки (тобто протокол визначає очікувану поведінку комутатора, але також як можна налаштувати поведінку за допомогою інтерфейсу).

**ONF мікрохвильова інформаційна модель.** Мікрохвильова інформаційна модель (IM) — це спроба ONF визначити стандарт загальної та загальної інформаційної моделі для бездротових транспортних середовищ із підтримкою SDN, щоб спростити роботу та контроль мережі радіолінії мікрохвиль/міліметрових хвиль. елементів (NE) і сприяти інтеграції різних рішень від багатьох постачальників у загальну та єдину структуру керування. Мікрохвильовий IM надається в ONF TR-532 [21] як технологічне розширення до TR-512 ONF CIM, яке може бути реалізоване як модель даних YANG, щоб контролер SDN міг керувати мікрохвильовим пристроєм. реалізовуватися через протокол NETCONF. Мікрохвильовий IM надає необхідні атрибути для пристрою, який інформує контролер SDN про свої можливості, контролер, який налаштовує пристрій, і пристрій, який надає інформацію про стан, проблеми та продуктивність. Наприклад, Microwave IM дозволяє конфігурувати частотні плани (розташування каналів), частоти каналів і смуги пропускання, використовувати схеми модуляції тощо.

Поточна специфікація обмежена радіолініями «точка-точка». Однак ця модель може бути дійсною відправною точкою для створення моделі для фізичного рівня супутника та використовуватися як внутрішній SBI для M&C нижніх рівнів SD (супутникові ресурси, такі як частотний план, схеми модуляції та кодування або інші супутникові - специфічні властивості).

**ONF Transport API.** ONF T-API прагне забезпечити програмований доступ до функцій транспортного контролера SDN шляхом абстрагування загального набору функцій рівня керування, таких як топологія мережі, запити на підключення та обчислення шляху до набору сервісних інтерфейсів. T-API призначені для застосування в інтерфейсі між транспортним контролером SDN «Black Box» і його клієнтською програмою. Актори, задіяні в обміні інформацією через цей інтерфейс, включають контролери домену постачальника транспортної мережі в ролі виробників і прикладні системи транспортної мережі в ролі споживачів. Прикладні системи транспортної мережі можуть бути або системою

бізнес-клієнта (яка сама по собі може включати деякі функції керування), або системами верхнього рівня керування, оркестровки та/або операцій мережевого оператора. T-API також призначені для однакового застосування між контролерами в рекурсивній ієрархії транспортного контролера. Очікувані послуги, які надаються T-API:

- Сервіс топології: API для отримання топології мережі, вузлів, зв'язків і крайових точок вузлів
- Служба з'єднання: API для запиту на створення, оновлення та видалення з'єднання, включаючи «точка-точка» та багатоточкове
- Служба обчислення шляху: API для запиту обчислення та оптимізації шляхів
- Служба віртуальної мережі: API для створення, оновлення та видалення топологій віртуальної мережі
- Служба сповіщень: API для підтримки моделей публікації/підписки для асинхронного сповіщення про події, такі як збої або погіршення якості

Хоча розробка ONF T-API все ще триває (наразі документ ONF TR-527 [20] містить лише функціональні вимоги для специфікації T-API), це може бути явним кандидатом на реалізацію NBI для M&C послуги потоку E2E, що надається супутниковою мережею.

**Модель YANG.** Моделі YANG були створені для конфігурації або моделювання різноманітних мережевих пристроїв, екземплярів протоколів і мережевих служб. Класифікація моделей даних YANG наведена в [37,38], останнє посилання більше зосереджено на моделях обслуговування. Зокрема, виділяють чотири види сервісних моделей YANG:

- Модель обслуговування клієнтів: модель обслуговування клієнтів використовується для опису послуги як пропозиції або надання клієнту оператором мережі.

- Модель надання послуг: модель надання послуг використовується оператором мережі для визначення та налаштування способу надання послуг мережею.
- Модель конфігурації мережі: модель мережевої конфігурації використовується мережевим оркестратором для надання моделі конфігурації мережевого рівня контролеру.
- Модель конфігурації пристрою: модель конфігурації пристрою використовується контролером для налаштування фізичних NE.

Як зазначалося раніше в модель YANG у поєднанні з протоколом RESTCONF/NETCONF забезпечують рішення для структури ACTN, яка справді прагне забезпечити ієрархію керування та інтерфейси, які дозволять розгортати багатодоменне транспортне SDN мережі. Таким чином, згідно з [26], моделі обслуговування клієнтів будуть застосовні до інтерфейсу CMI ACTN, моделі конфігурації мережі до MPI, а моделі конфігурації пристроїв до SBI. У цьому контексті та з огляду на те, що інтеграція запропонованого контролера SDN супутникової мережі в архітектуру ACTN, ймовірно, буде реалізована через інтерфейс MPI, існуючі моделі YANG, застосовні в інтерфейсі MPI, які не є специфічними для технології OTN/WSN.

Крім того, існує також IETF Internet Draft [39], спрямований на опис випадків використання, які можуть бути використані для аналізу застосовності існуючих моделей, визначених IETF для транспортних мереж з акцентом на інтерфейсі MPI.

### **3 ЕФЕКТИВНІ ШЛЯХИ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

#### **3.1 Інтеграційний підхід для ТЕ на основі E2E SDN у наземно-супутникових транзитних мережах**

Розглянемо функціональну архітектуру на основі SDN для наземного та позаземного сегмента системи супутникового ширококутного зв'язку та різні альтернативи для підтримки концепцій і технологій SDN у внутрішніх і зовнішніх інтерфейсах супутникової мережі.

Переконливим сценарієм використання супутникових мереж на основі SDN є мобільний транзитний зв'язок [11], де супутникова пропускна здатність може бути використана для доповнення наземної інфраструктури зворотного зв'язку (наприклад, оптоволоконних і радіоканалів, що з'єднують сайти базових станцій) не лише у важкодоступних місцях, а також для більш ефективної доставки трафіку до вузлів RAN, підвищеної стійкості та кращої підтримки для швидкого, тимчасового розгортання клітинок і переміщення клітинок. У цьому контексті демонстрація можливостей контролю та управління послугами супутникового зв'язку через інтерфейс на основі SDN дозволить оператору мобільної мережі (MNO) легко інтегрувати та керувати супутниковим компонентом в інфраструктурі транспортного зв'язку, яка поступово розвивається, спираючись на технології SDN для аналога наземної потужності. Управління як наземною, так і супутниковою потужністю в рамках централізованої та постійно керованої структури SDN дозволяє розгорнути рішення ТЕ на основі E2E SDN.

Механізми ТЕ використовуються для оптимізації продуктивності мережі передачі даних шляхом динамічного аналізу, прогнозування та регулювання поведінки трафіку в мережі [40]. В інтегрованій наземно-супутниковій транзитній мережі рішення ТЕ повинні мати можливість використовувати супутникову пропускну здатність у спосіб, який найкраще доповнює наземну пропускну здатність перед мінливими умовами попиту на трафік (наприклад, збільшення

попиту на трафік для особливої події, коливання просторового попиту з плином часу) і ситуацію в мережі (наприклад, резервне копіювання на випадок збоїв наземного зв'язку, швидке розгортання мережі, здатність швидкого реагування та комірки на колесах). Послідовне зіткнення з цими численними та різноманітними умовами стає складним для TE. Порівняно з традиційними механізмами MPLS/TE, що використовуються в сучасних транспортних мережах, велика перевага централізованої структури SDN для реалізації рішень TE полягає в тому, що існує цілісне уявлення про мережу разом із механізмами для забезпечення дотримання мережевих політик з одного боку точки дотику [41].

Структура мережевої архітектури для реалізації TE на основі E2E SDN у наземно-супутникових транзитних мережах представлена нижче разом із парою ілюстративних робочих процесів TE для перевірки запропонованого підходу до інтеграції.

**Структура архітектури мережі.** Існує декілька пропозицій щодо впровадження концепцій SDN в архітектури мобільних мереж [42,43]. У загальних рисах, ілюстративний вигляд мобільного зв'язку на основі SDN, який використовує транспорт з підтримкою SDN від вузлів RAN (наприклад, базових станцій) до базової мережі, зображений на рисунку 3.1. Хоча ця архітектура контекстуалізована для технології LTE, це бачення вважається загальним і не обмежене специфікою стандарту LTE.

Як показано на рисунку 3.1, функції керування мобільною базовою мережею (MCN) [напр. функціональні елементи об'єкта керування мобільністю (MME) і мережевих шлюзів обслуговування/пакетної передачі даних (S/P-GW) у LTE Evolved Packet Core] разом зі спеціальними функціями TE для транспортної мережі реалізуються як програми, що працюють поверх контролера SDN (представленого тут як єдиний функціональний об'єкт, але, ймовірно, буде слідувати ієрархічній структурі контролерів). Цей контролер SDN відповідає за керування NE, які забезпечують комутацію пакетів і можливості пересилання в транспортній мережі. У цьому відношенні базова інфраструктура транспортної мережі може включати низку різного фізичного мережевого обладнання або

пристроїв пересилання, таких як маршрутизатори, комутатори та віртуальні комутатори, щоб назвати декілька. Спираючись на наведений вище погляд на мобільні мережі на основі SDN і архітектуру супутникової мережі на основі SDN, на рисунку 3.2 зображено функціональний вигляд запропонованого підходу до інтеграції, який базується на двох основних концепціях:

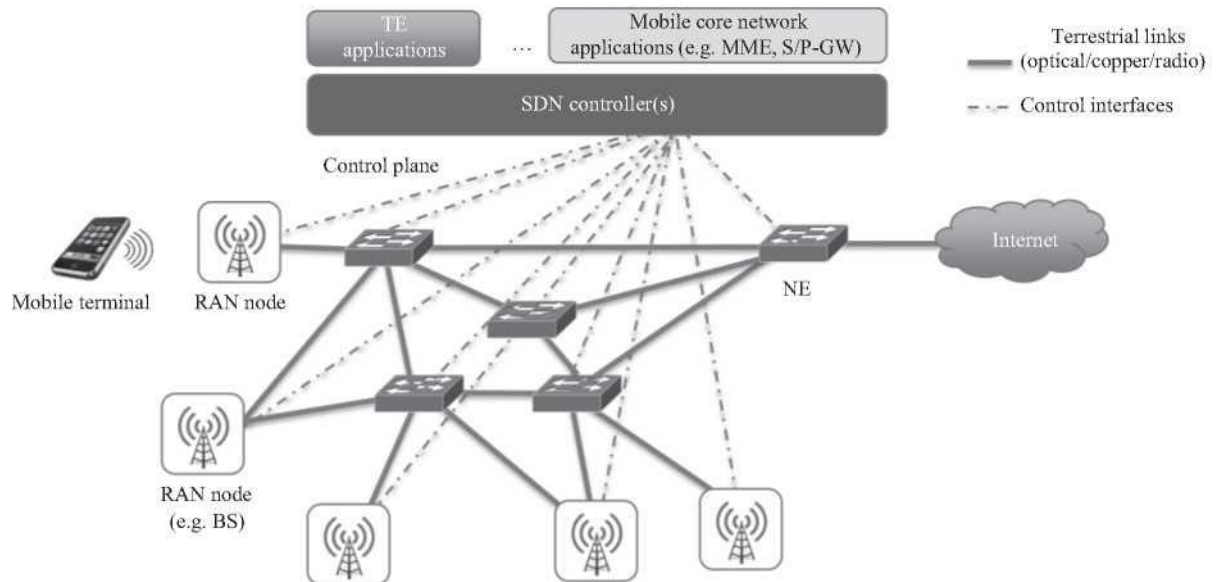


Рис. 3.1. Ілюстративний вигляд мобільної мережі на основі SDN

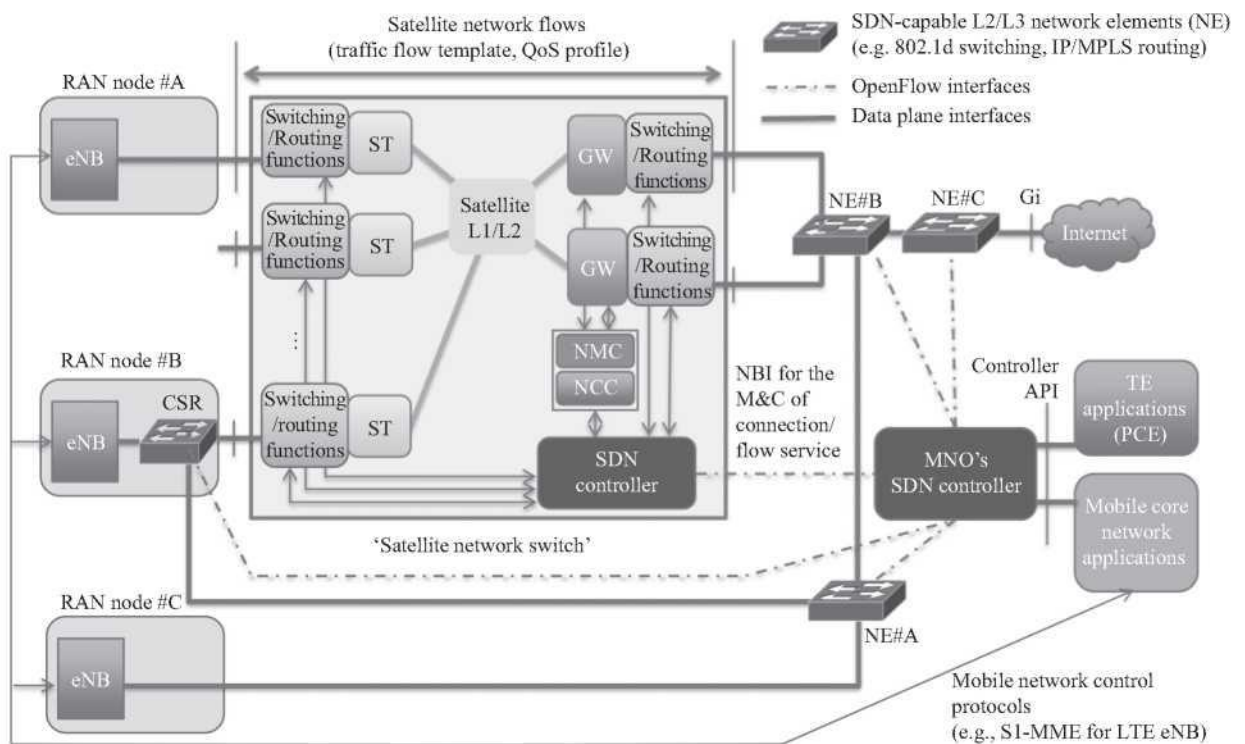


Рис. 3.2. Функціональне подання та ілюстративна топологія мережі, що використовуються в робочих процесах TE



- Абстракція загальної супутникової мережі як «комутатора», що підтримує SDN. Зокрема, модель абстракції комутатора OF [36] розглядається як модель роботи супутникової мережі, як видно з об'єкта контролера MNO SDN. Це відповідає одному з потенційних рішень для реалізації інтерфейсу NBI для контролю та управління послугами підключення до супутникової мережі.

- Використання додатків TE на основі SDN із центральним механізмом обчислення шляху (PCE), який підтримує роботу додатків MCN для керування трафіком у транспортній мережі зворотного зв'язку. Передбачається, що загальна транспортна мережа керується як єдиний логічний домен пересилання і що всередині домену пересилання контролер SDN оператора MNO приймає рішення про пересилання. Як показано на рисунку 3.2, усі сумісні з SDN L2/L3 NE підключаються до мережевого контролера SDN MNO через інтерфейси OF, включаючи «комутатор супутникової мережі». Таким чином, механізми TE на основі SDN можуть безперешкодно охоплювати всю мережу. Для наземного підключення не передбачається жодної конкретної технології, а не враховується, що потоками трафіку також можна керувати за допомогою функцій SDN.

Щоб підняти різні міркування щодо роботи процедур TE, ілюстративна топологія мережі, зображена на рисунку 3.2, розглядає три вузли RAN з функціями LTE eNB, один підключений до транспортної мережі лише за допомогою наземних засобів (вузол RAN#C), інший підключений лише через супутникову мережу (вузол RAN#A) і третій (вузол RAN#B), підключений як до наземного з'єднання, так і до супутникового з'єднання через маршрутизатор комутації клітинок (CSR), що підтримує SDN. Цей третій випадок використовується для ілюстрації реалізації механізмів TE для багатопроменевої оптимізації. Що стосується наземної частини транспортної мережі, три NE включені в топологію еталонної мережі, два з яких діють як внутрішні вузли агрегації/ядра в транспортній мережі (тобто NE#A і NE#B), а третій (тобто NE#C), що забезпечує взаємозв'язок із зовнішніми мережами (наприклад, Інтернет) через звичайний інтерфейс 3GPP Gi.

Слід зазначити, що, окрім інтерфейсів OF для керування функцією пересилання транспортної мережі, у загальних налаштуваннях, ймовірно, будуть присутні інші інтерфейси керування для інших цілей, наприклад інтерфейс 3GPP S1-MME між MCN програми та eNB у вузлах RAN для керування активацією/деактивацією каналів радіодоступу (RAB) в eNB для обслуговуваних мобільних терміналів.

**Ілюстративні робочі процеси TE.** Для підтвердження запропонованого підходу до інтеграції представлено два ілюстративних робочих процесів. Перший показує активацію потоку трафіку через супутниково-наземну мережу для забезпечення виконання каналу мобільної мережі [наприклад, так званий носій розширеної пакетної системи (EPS) у контексті LTE], який може виграти від обчислення оптимального шляху. Другий робочий процес показує модифікацію вже встановленого потоку як реакцію на перевантаження/збій в одній ланці в транспортній мережі.

**Активація потоку з обчисленням оптимального шляху.** На основі топології мережі, зображеної на рисунку 3.2, на рисунку 3.3 представлена діаграма повідомлень із механізмом обчислення шляху для оптимізації багатопляхового супутниково-наземного трафіку. Зокрема, наданий робочий процес охоплює випадок встановлення виділеного каналу EPS, який покладається на механізм обчислення шляху TE для активації шляху трафіку між вузлом RAN і зовнішньою мережею, доступною через NE#C, враховуючи характеристики каналу EPS і умови навантаження по всій мережі.

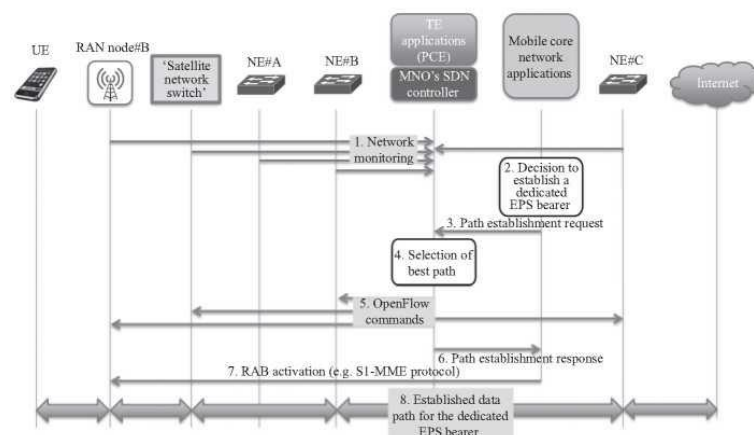


Рис. 3.3. Активація потоку з обчисленням оптимального шляху

Передбачається, що контролер SDN має глобальне уявлення про топологію мережі, яке може бути представлено за допомогою графіка, що включає всі зв'язки між комутаторами OF [зв'язки можна знайти, наприклад, за допомогою використання протоколів, таких як LLDP (802.1AB), який використовується мережевими пристроями для реклами своєї ідентичності, можливостей і сусідів]. Деталі різних етапів, зображених на малюнку 3.3, наведено нижче:

- Крок 1: моніторинг елементів пересилання SDN у межах домену, включаючи CSR, «комутатор супутникової мережі» та NE. Такі рішення, як описане в [44], дозволяють контролеру OF мати точний моніторинг пропускну здатності потоку, втрати пакетів і показники затримки, щоб допомогти TE. У цьому відношенні, поки потік активний, контролер і елемент пересилання SDN можуть обмінюватися повідомленнями щодо стану потоку.

- Крок 2: у результаті активації нової послуги (наприклад, послуги потокового відео високої чіткості) мобільним терміналом, підключеним до вузла RAN#B, MCN вирішує встановити новий виділений носій EPS для підтримки цієї послуги. Для активації виділеного каналу EPS потрібна активація потоку з гарантіями QoS у всій транспортній мережі. Двома крайовими вузлами каналу EPS є вузол RAN #B, де передбачається, що UE підключено, і NE#C, який служить шлюзом до зовнішньої мережі.

- Крок 3: MCN запитує програму TE обчислення найкращого шляху між вузлом RAN#B і NE#C. Вказуються атрибути QoS каналу EPS (наприклад, гарантована швидкість передачі даних).

- Крок 4: На основі (1) знань топології мережі, (2) інформації моніторингу мережі та (3) атрибутів QoS потоку програма TE може обчислити найбільш відповідний шлях. Тут можуть підтримуватися різні алгоритми, включно з алгоритмами пошуку на графіках для пошуку шляху та алгоритмами для вибору шляху залежно від політик із відповідним TE або якістю обслуговування, наприклад, обчислення переадресації найкоротшого шляху на основі узгодженого перегляду стану мережі або програми забезпечення інформованої маршрутизації

[45]. У будь-якому випадку результатом цього рішення є вибір шляху через супутникову мережу для цього потоку.

- Крок 5: Записи потоку встановлюються в комутатори OF контролером SDN MNO, щоб трафік, пов'язаний з каналом EPS, пересилався через вибраний шлях.
- Крок 6: MCN отримує відповідь про встановлення шляху.
- Етап 7: Відбувається активація каналу EPS на радіорівні (тобто активація RAB), що включає взаємодію між функціями MCN та eNB у вузлі RAN#B.
- Крок 8: Площина даних для виділеного каналу EPS стає активною, і трафік слідує за вибраним шляхом через супутникову мережу.

Наведений вище робочий процес передбачає, що шлях встановлено для підтримки одного носія EPS. Однак той самий підхід буде використано у разі визначення найкращого шляху для агрегатів трафіку із загальними вимогами QoS. Це добре підтримується в OF, просто встановлюючи відповідні умови відповідності (наприклад, префікси IP для ідентифікації сукупного трафіку перед конкретними IP-адресами окремих потоків).

**Оновлення потоку для подолання перевантаження/збоїв.** На рисунку 3.4 показано, як збій шляху або просто перевантаження шляху, що може спричинити погіршення QoS, може бути оброблено в рамках запропонованого підходу до інтеграції. Зокрема, діаграма повідомлень, зображена на рисунку 3.4, є механізмом TE, який оновить уже встановлений потік, щоб подолати подію перевантаження/збою. Деталі різних етапів, зображених на рисунку 3.4, наведено нижче:

- Крок 1: початкова точка передбачає, що трафік від/до вузла RAN#B і від/до вузла RAN#C, які називаються трафіком B і трафіком C відповідно, проходять через NE#A, NE#B і NE#C . Можна припустити, що це оптимальний шлях трафіку для сценарію помірному трафіку.
- Крок 2: моніторинг елементів пересилання SDN здійснюється контролером SDN оператора мобільного зв'язку, як описано в попередньому робочому процесі.

- Крок 3: Сталася подія, яка ставить під загрозу QoS встановлених потоків. Це може бути, наприклад, значне збільшення трафіку у вузлі RAN #C у певний час доби, що перевантажує канал між NE#A і NE#B, який спільно використовується трафіком B і трафіком C.

- Крок 4: Програма TE виявляє ситуацію перевантаження. Наприклад, програма TE могла б встановити високий поріг використання 60% і низький поріг використання 20% для навантаження трафіку на спільне послання. Якщо цей високий поріг перевищено, спостерігається високе використання і, наприклад, частина трафіку B може бути переключена на проходження через супутникову мережу.

- Крок 5: Записи потоку встановлюються на комутатори OF уздовж шляху контролером SDN оператора MNO, щоб перенаправити частину трафіку B через супутникове з'єднання.

- Крок 6: Хоча шлях для трафіку C залишається незмінним, тепер частина трафіку B обслуговується через супутникову мережу, зменшуючи перевантаження в каналі між NE#A та NE#B.

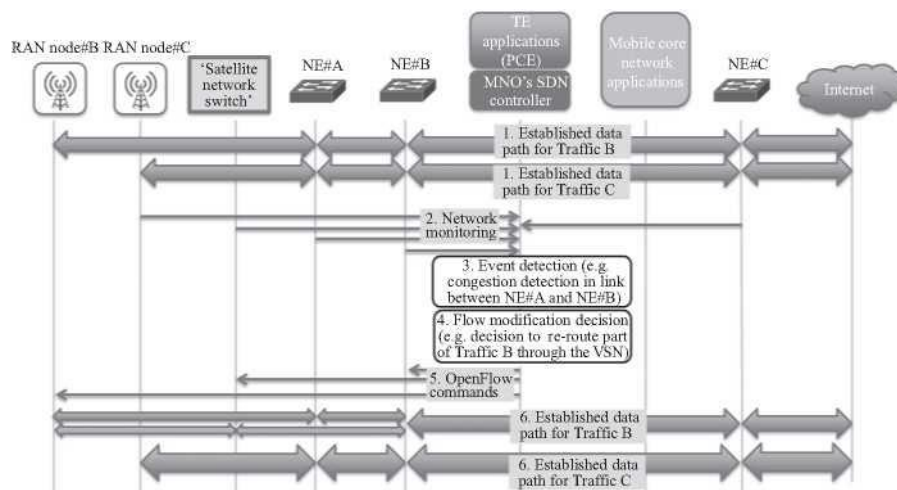


Рис. 3.4. Оновлення потоку для подолання перевантаження/збоїв

Оновлення потоку також може керуватися захистом з'єднання на випадок збою. Дійсно, захист шляху та відновлення мережі після збою є критичними аспектами TE. Незважаючи на те, що ці аспекти добре зрозумілі в звичайних мережах MPLS/IP, ще потрібна робота, щоб удосконалити ці концепції в контексті мереж SDN [46].

**Ілюстративна програма TE на основі SDN.** Програми TE на основі SDN вже були запропоновані в основному для сценаріїв центрів обробки даних або корпоративних мереж ([47] для детального огляду та [48] для обговорення методів керування потоком, відмовостійкості, оновлення топології та характеристики трафіку). У контексті сценаріїв транспортного зв'язку мобільного зв'язку запропонований підхід до інтеграції супутниково-наземної мережі на основі SDN можна використовувати для розробки додатків TE, які використовують такі функції та критерії:

- Розрахунок маршруту E2E з вибором наземного або супутникового каналу для зворотного зв'язку, більш повно враховуючи численні додаткові коефіцієнти використання каналу та характеристики потоку.
- Механізми резервування ресурсів для захисту або надання переваг додаткам/користувачам/розташуванням, таким як BS без або з обмеженою пропускнуою здатністю наземного зв'язку, які повністю залежать від використання пулу спільної супутникової потужності.
- Різні критерії розподілу залежно від характеру трафіку (наприклад, гарантований бітрейт чи ні, одноадресна або багатоадресна передача).
- Контроль допуску та контроль швидкості, щоб протистояти перевантаженню та гарантувати ресурси та мінімальні (закріплені) швидкості передачі на потік і групу потоків.
- Використання критеріїв максимізації корисності мережі, де можна врахувати адекватність обробки конкретних потоків через наземний або супутниковий компонент, а також ефект розподілу більшої чи меншої швидкості передачі даних.
- Використаємо функції пропускнуої здатності на вимогу (BoD) [49].
- Контроль активації/деактивацію мережевих функцій для оптимізації трафіку (наприклад, ініціюємо розгортання віртуальних мережевих функцій для

стиснення, оптимізації TCP тощо в супутникових мережах із підтримкою NFV [50]).

У цьому контексті рішення TE, сформульоване та оцінене в цьому розділі, поєднує в собі такі функції керування як частину своєї логіки прийняття рішень: вибір шляху, контроль доступу, контроль швидкості та керування резервуванням, як показано на рисунку 3.5.



Рис. 3.5. Компоненти додатку для розробки трафіку E2E

Концепція логіки TE вимагає, щоб спочатку була встановлена спеціальна характеристика трафіку та зв'язку [51]. Це необхідно для визначення, якщо це застосовно, вимог до QoS, таких як максимальна допустима затримка та тремтіння, мінімальна необхідна пропускна здатність тощо для кожного типу послуги/користувача, які мають бути виконані для досягнення заданого рівня QoE/задоволення. З цією метою ми вдаємося до використання функцій корисності для опису QoE/рівня задоволеності, який досягається, коли певний потік обслуговується через гібридну супутниково-наземну транзитну мережу. У нашому випадку функції корисності сформульовано для врахування двох основних аспектів: (1) біткової швидкості, яку потік може розподілити по шляху E2E, і (2) того, проходить шлях E2E через супутникову лінію чи ні (тобто більша затримка під час використання супутникового зв'язку може призвести до певного погіршення рівня обслуговування, що відображається в нижчій корисності).

Крім того, формулювання функцій корисності також залежить від характеру послуг. У нашому аналізі ми розглядаємо поєднання потокового та еластичного трафіку, а також одноадресного та багатоадресного трафіку. Нееластичний/поточний трафік генерується чутливими до часу програмами, як-от передача голосу через IP і потокове відео на вимогу (VSOD), зазвичай має суворі вимоги до пропускної здатності та/або затримки. З іншого боку, еластичний

трафік створюється такими програмами, як перегляд веб-сторінок і передача файлів, де швидкість передачі даних і/або час завантаження важливіші, ніж затримки між пакетами або E2E. Дійсно, ця класифікація трафіку враховується в моделі QoS, створеній для систем LTE, враховуючи два типи несучих послуг, які можуть застосовуватися в мережі: несучі з гарантованою швидкістю передачі даних (GBR) і несучі без GBR. Таким чином, одноадресним потокам трафіку, що обслуговуються через канали GBR (надалі називаються потоками UG), надається мінімальна гарантована швидкість передачі даних для задовільної роботи; в іншому випадку це може серйозно вплинути на якість. З іншого боку, одноадресні потоки трафіку, що обслуговуються через не-GBR-носії (надалі називаються потоками UN), не отримують такого резервування мінімальної швидкості передачі даних, але можуть спостерігати широку варіативність досягнутої швидкості передачі даних, будучи більш схильними до перевантаження. пов'язані втрати пакетів і/або мінливість затримки (без обов'язкового помітного впливу на QoS). Наша модель трафіку також включає багатоадресні послуги GBR (надалі звані службами MG). Розгляд послуг MG в аналізі дозволяє нам використовувати внутрішню ширококомовну/багатоадресну пропускну здатність супутникового компонента, оцінюючи його вплив на мережу з точки зору QoS. На відміну від послуг одноадресної передачі, один конкретний сеанс MG може складатися з кількох потоків MG, які одночасно пересилаються на декілька базових станцій [52].

Виходячи з наведених вище міркувань, функції корисності, розглянуті в нашому аналізі для характеристики послуг UG, MG та UN, наведені в таблиці 3.1.

Усі функції корисності враховують доставлену швидкість передачі даних ( $r$ ) і враховують, чи обслуговується потік через супутник ( $x = 0$ ) чи наземний транспортний зв'язок ( $x = 1$ ). Зокрема, дворівнева крокова функція використовується для потоків UG [53], що відображає дві можливі швидкості бітів/якість.

Мережеві рівні, які можуть бути запропоновані (наприклад, VSOD стандартної та високої чіткості). Ця функція корисності UG, визначена (3.1)-(3.3)



у таблиці 3.1, параметризована бітовими швидкостями  $R\backslash G$  і  $R2UG$ , які надаються для стандартних/високоякісних пропозицій відповідно; коефіцієнт зменшення корисності  $pUG$  для врахування потенційного погіршення якості/задоволення при використанні супутникових ліній замість наземних; і коефіцієнт зменшення корисності  $aUG$  для врахування впливу вибору тарифу між  $R1UG$  і  $R2UG$ .

Таблиця 3.1.

## Функції корисності

Utility function	Equation	Graph
<b>UG services</b>		
$U^{UG}(r, x) = U_o^{UG}(x) \cdot U_r^{UG}(r)$	(3.1)	
where		
$U_o^{UG}(x) = p^{UG} + x(1 - p^{UG})$	(3.2)	
and		
$U_r^{UG}(r) = \begin{cases} 0 & 0 < r < R_1^{UG} \\ \alpha^{UG} & R_1^{UG} < r < R_2^{UG} \\ 1 & r \geq R_2^{UG} \end{cases}$	(3.3)	
<b>MG services</b>		
$U^{MG}(r, x) = U_o^{MG}(x) \cdot U_r^{MG}(r)$	(3.4)	
where		
$U_o^{MG}(x) = p^{MG} + x(1 - p^{MG})$	(3.5)	
and		
$U_r^{MG}(r) = \begin{cases} 0 & 0 < r < R_1^{MG} \\ 1 & r \geq R_1^{MG} \end{cases}$	(3.6)	
<b>UN services</b>		
$U^{UN}(r, x) = U_o^{UN}(x) \cdot U_r^{UN}(r)$	(3.7)	
where		
$U_o^{UN}(x) = p^{UN} + x(1 - p^{UN})$	(3.8)	
and		
$U_r^{UN}(r) = \begin{cases} \frac{\log(r+1)}{\log(R_1^{UN}+1)} & \text{if } 0 < r \leq R_1^{UN} \\ 1 & \text{if } r > R_1^{UN} \end{cases}$	(3.9)	

Для характеристики потоків послуг MG використовується однорівнева функція корисності кроку, як визначено (3.4)-(3.6) у таблиці 3.1. У цьому випадку  $RMG$  — це мінімальний бітрейт, який необхідно надати для високої якості, а параметр  $rMG$  — це коефіцієнт зменшення корисності для врахування потенційного погіршення якості/задоволення при використанні супутникових каналів зв'язку замість наземного.

Що стосується потоків послуг ООН, функції корисності можуть бути більш різноманітними [54], залежно від того, які конкретні аспекти/характеристики послуги потрібно підкреслити. У цьому випадку ми прийняли логарифмічну функцію корисності [55], яка є однією з найбільш часто використовуваних і вже відповідає нашим потребам. Нормалізована функція корисності потоків послуг UN визначається формулою (3.7)-(3.9) у таблиці 3.1, де RUN використовується для встановлення бітової швидкості, для якої вважається, що послуга вже надається з хорошою якістю (тому немає виграшу від корисності). передбачається обслуговуванням потоків послуг UN з вищими бітовими швидкостями), а параметр  $rUN$  є коефіцієнтом зменшення корисності для потоків послуг UN.

**Логіка прийняття рішень TE.** Логіка прийняття рішень TE складається з комбінації процесів, деякі з яких виконуються, коли є певний тригер (наприклад, новий запит потоку), а інші виконуються періодично (наприклад, обчислення метрики продуктивності та коригування потоку). На рисунку 3.6 показано логіку прийняття рішень TE для обробки запиту потоку UG. Щоразу, коли є запит на новий потік UG, перевіряється, чи повинен новий потік UG обслуговуватися через BS, яка має робочі наземні та супутникові канали зв'язку, або BS, яка має лише доступну супутникову пропускну здатність (наприклад, збій наземного зв'язку, TBS без наземного зворотного зв'язку).

У першому випадку алгоритм TE продовжує перевірку наявності достатньої пропускну здатності на будь-якому з шляхів для обслуговування нового потоку без шкоди для якості вже встановлених потоків GBR (активні потоки UG і MG). Це досягається шляхом встановлення порогового значення навантаження доступу

GBR, щоб обмежити максимальну зайнятість пропускної здатності каналу, дозволеного для використання трафіку GBR. Цей параметр використовується логікою елементів керування допуском 1 і 2 (детальніше в таблиці 3.2). Якщо є достатня пропускна здатність між супутниковими та наземними лініями зв'язку, блок-схема продовжується обчисленням досяжної глобальної мережевої корисності (тобто сукупної корисності встановлених потоків плюс корисності нового потоку) для кожного з двох шляхів-кандидатів, вибираючи який веде до більшого збільшення корисності. Зауважте, що обчислення корисності не проводиться, якщо є лише варіант-кандидат або коли жоден із них недоступний, що призводить до відхилення запиту потоку UG в останньому випадку. Для прийнятих запитів на потік UG GBR і максимальна швидкість передачі даних (MBR) встановлюються на швидкість, яка забезпечує максимальну корисність для послуг UG.

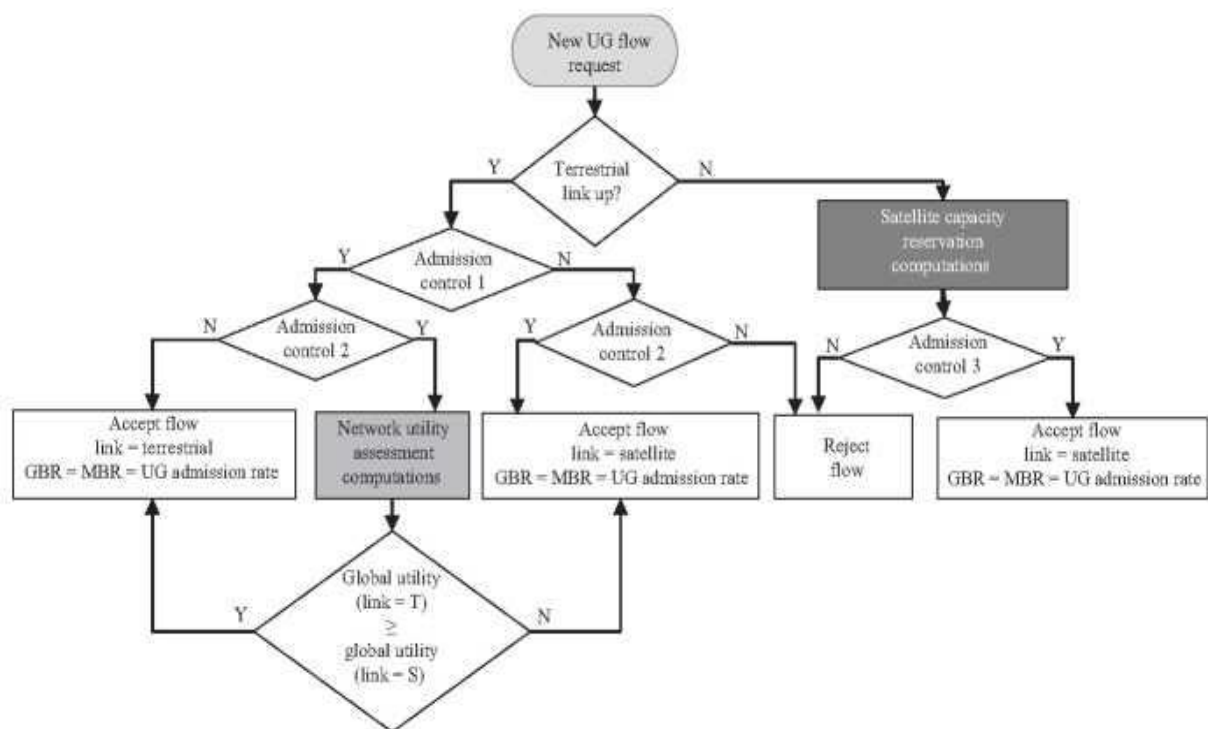


Рис. 3.6. Логіка прийняття рішень ТЕ для обробки нових надходжень потоку UG

Як зазначалося раніше, блок-схема на рисунку 3.10 також відображає випадок, коли потік UG має обслуговуватися через BS, де наземне з'єднання недоступне. У зв'язку з цим, як видно на правій стороні блок-схеми, механізм керування резервуванням ресурсів вводиться в процес прийняття рішень. Цей

механізм використовується для забезпечення преференційного режиму використання спільної супутникової потужності для BS без робочого наземного зв'язку. Таким чином, при надходженні нового запиту на потік UG, тепер логіка TE спочатку проходить через контроль надходження 3 (деталізовано в таблиці 3.3), який враховує кількість зарезервованої супутникової ємності, яка динамічно коригується з часом для обслуговуючої BS. Обчислення, необхідні для керування таким резервуванням пропускної здатності супутників, детально описано далі в цьому розділі.

Логіка прийняття рішень TE для обробки запитів потоку ООН зображена на рисунку 3.7. Подібно до обробки потоків UG, алгоритм TE спочатку перевіряє, чи повинен новий потік UN обслуговуватися через BS як з наземним, так і з супутниковим зв'язком.

Рівень прийому UG: рівень, який враховується в процесі вступу. Його вибирають із ставок, зазначених для визначення функцій корисності в таблиці 3.1.

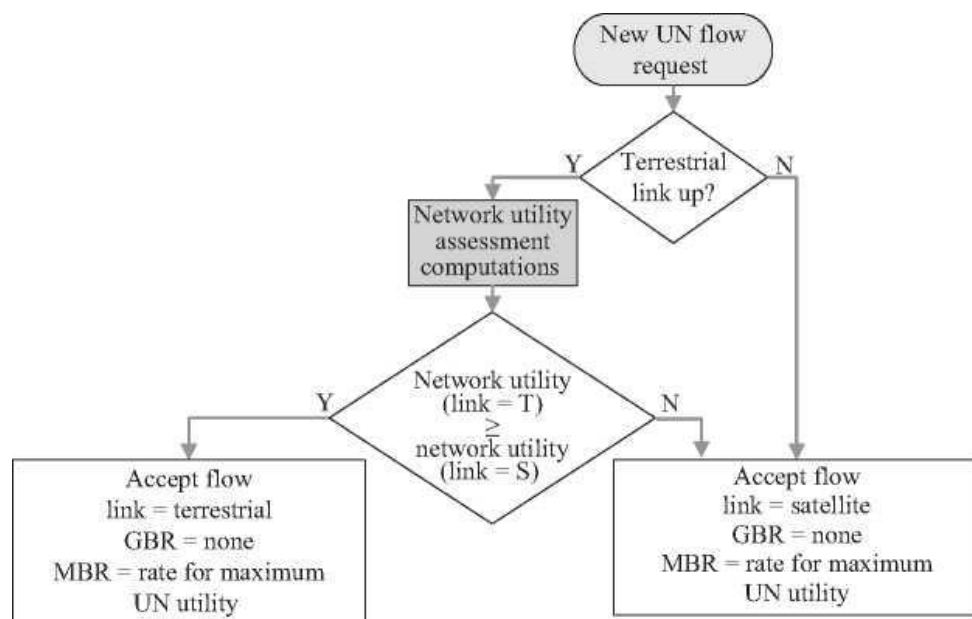


Рис. 3.7. Логіка прийняття рішень TE для обробки нових надходжень потоку ООН

Зарезервована ємність супутників ( $C_r$ ): ємність супутників, зарезервована для переважного використання певної BS GBR, порогове значення навантаження

на доступ: максимальний відсоток доступної (супутникової, наземної та зарезервованої) ємності, яка може бути використана для обслуговування трафіку GBR.

Таблиця 3.2.

## Контрольні розрахунки допуску

Приймальний контроль	Опис
Приймальний контроль 1	(Наземне навантаження GBR на рівні BS + UG) < (порогове значення навантаження на GBR)
Приймальний контроль 2	Пропускна здатність супутникового зв'язку на BS) I (Глобальне навантаження супутника GBR + рівень доступу UG) < [порогове значення навантаження доступу • (ємність супутникової системи - зарезервована потужність супутника)]
Приймальний контроль 3	GBR супутникове навантаження при рівні доступу BS + UG) < (порогове значення GBR доступу • зарезервована ємність супутника на BS)

### 3.2 Розрахунки необхідні для інтеграції наземно-супутникового зв'язку

У першому випадку наступним кроком є обчислення загального збільшення корисності, яке було б досягнуто, якщо потік забезпечується через наземні або супутникові канали зв'язку, вибираючи варіант, який перетворюється на більш високе збільшення корисності мережі. В останньому випадку, показаному праворуч на рисунку 3.7, потік завжди забезпечується через супутникове з'єднання, а сума резервування відповідно оновлюється. Автор зауважує, що, на

відміну від обробки потоків UG, для потоків UN контроль доступу не застосовується через його еластичну природу трафіку (тобто швидкості, досягнуті на потік, є змінними та залежать від загальної кількості потоків, які одночасно обслуговуються в мережі). Таким чином, для дозволених потоків не встановлюється швидкість GBR, а параметр MBR, який використовується для контролю швидкості, встановлюється на швидкість, яка забезпечує максимальну корисність для послуг ООН.

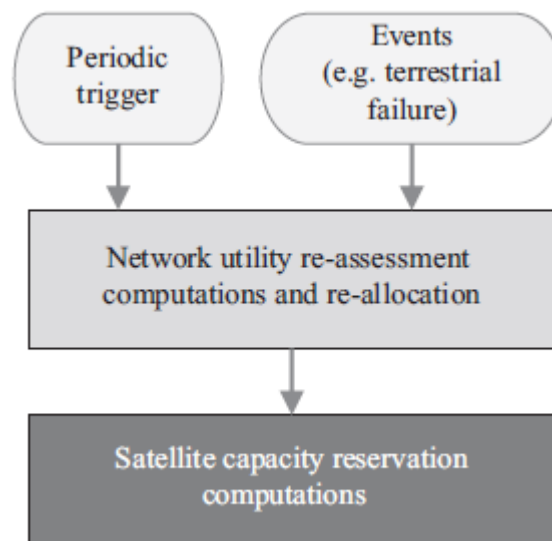


Рис. 3.8. Логіка безперервної переоцінки корисності мережі, перерозподіл та оновлення бронювання

Таблиця 3.3.

### Розрахунки супутникового резервування

Параметри контролю резервування	Обчислення
Зарезервована ємність супутника на BS <sub>m</sub> (C <sub>rm</sub> )	$C_{rm} = \text{супутникове навантаження UG на BS}_m + \text{супутникові потоки ООН на BS}_m \cdot \text{Середня глобальна швидкість потоку ООН}$
Супутникова незарезервована ємність (C <sub>nr</sub> )	$C_{nr} = \text{Ємність супутникової системи (CS)} - \text{BS } C_{rm}$

Обмеження:

- Загальна зарезервована ємність супутника  $<$  Максимальна зарезервована ємність
- Зарезервована ємність супутника на  $BS_m <$  Максимальна резервована ємність на  $BS$
- Зарезервована ємність супутника на  $BS_m <$  Пропускна здатність наземного зв'язку на  $BS_m$  місткість

Дійсно, враховуючи, що однією з умов, які призводять до максимізації глобальної корисності, є справедливий розподіл ставок, що надаються потокам ООН, цей механізм резервування допомагає досягти справедливості з точки зору загального розподілу потужності між базовими станціями (тобто базові станції без наземної потужності отримують більша частка ємності супутника). З цією метою вводиться змінна зарезервованої ємності супутника ( $C_r$ ). Цей параметр ініціалізується значенням резервування за замовчуванням і періодично оновлюється з часом на основі зміни навантаження трафіку, що обслуговується через відповідну  $BS$  (подробіці наведено в таблиці 3.3). Зокрема,  $C_r$  обчислюється для врахування навантаження трафіку  $UG$ , що підтримується на  $BS$ , плюс додаткова пропускна здатність для трафіку  $UN$ , що дозволило б забезпечити середню швидкість передачі даних, досягнуту в усій мережі для потоків  $UN$ . Значення  $C_r$  обмежується пропускною здатністю наземної лінії зв'язку на  $BS$ , максимальним резервуванням пропускної здатності на  $BS$  і максимальним резервуванням пропускної здатності, застосовним до загальної зарезервованої пропускної здатності супутника. Залишковий ресурс супутникової системи, доступний для  $BS$  з наземною пропускною здатністю, визначається як супутникова незарезервована пропускна здатність ( $C_{nr}$ ).

Дійсно, враховуючи, що однією з умов, які призводять до максимізації глобальної корисності, є справедливий розподіл ставок, що надаються потокам ООН, цей механізм резервування допомагає досягти справедливості з точки зору загального розподілу потужності між базовими станціями (тобто базові станції без наземної потужності отримують більша частка ємності супутника). З цією метою

вводиться змінна зарезервованої ємності супутника ( $C_r$ ). Цей параметр ініціалізується значенням резервування за замовчуванням і періодично оновлюється з часом на основі зміни навантаження трафіку, що обслуговується через відповідну BS (подробіці наведено в таблиці 3.3). Зокрема,  $C_r$  обчислюється для врахування навантаження трафіку  $UG$ , що підтримується на BS, плюс додаткова пропускна здатність для трафіку  $UN$ , що дозволило б забезпечити середню швидкість передачі даних, досягнуту в усій мережі для потоків  $UN$ . Значення  $C_r$  обмежується пропускною здатністю наземної лінії зв'язку на BS, максимальним резервуванням пропускної здатності на BS і максимальним резервуванням пропускної здатності, застосовним до загальної зарезервованої пропускної здатності супутника. Залишковий ресурс супутникової системи, доступний для BS з наземною пропускною здатністю, визначається як супутникова незарезервована пропускна здатність ( $C_{nr}$ ).

Незважаючи на те, що максимізація корисності мережі прагне досягнути кожного приходу потоку, коливання трафіку (наприклад, припинення встановлених потоків) і зміни в умовах пропускної спроможності (наприклад, зміни в резервуваннях, збої в наземному з'єднанні) можуть перетворитися на ситуації, коли досягнута корисність мережі не є оптимальною. Щоб протистояти цій ситуації, розглядається механізм переоцінки мережевої корисності встановлених потоків і, якщо необхідно, виконання будь-яких перерозподілів. Цей процес показано на рисунку 3.8. Як видно на малюнку, повторна оцінка мережевих утиліт і перерозподіл запускаються періодично, а також через виникнення певних подій, таких як зміна обсягу пропускної здатності в мережевому каналі. На рисунку 3.8 також показано, що після виконання процесу повторної оцінки мережевої утиліти та перерозподілу резервування пропускної здатності також переглядається для врахування будь-яких змін, які застосовуються до поточних потоків.

Механізм керування резервуванням має на меті гарантувати, що деяка кількість супутникової ємності залишається доступною для BS, яка не



враховується як наземна для обчислення та перерозподілу мережевих утиліт для повторної оцінки

Розрахунок резервування ємності супутника. Діаграма стану, яка описує роботу стратегії переповнення, зображена на рисунку 3.9. Вважається, що кожна БС як наземної, так і супутникової потужності може перемикатися між двома робочими станами переповнення: ВИМКНЕНО та УВИМКНЕНО. У ВИМКНЕНОму стані весь згенерований зворотний трафік обробляється через наземне з'єднання. В іншому випадку транзитний трафік, створений, коли BS перебуває у стані УВИМКНЕНО, завжди спрямовується через супутникову лінію. Як показано на рисунку 3.9, коли наземна потужність недоступна, режим роботи залишається в стані переповнення УВИМКНЕНО.

Перехід між станом ВИМКНЕНО та УВИМКНЕНО встановлюється на основі подвійної умови (умова 1 на рисунку 3.9): обсяг навантаження GBR (потокі UG та MG) почав перевищувати заданий поріг (поріг активації навантаження переповнення GBR) або середню швидкість, що надходить до потоків ООН, впала нижче заданого порогу (поріг активації швидкості переповнення ООН). Зміна виконується, якщо ця умова виконується для інтервалу прийняття рішення про переповнення (кТ). Подібним чином, перехід від станів УВИМКНЕНО до ВИМКНЕНО (умова 2 на рисунку 3.9) визначається відповідною подвійною умовою: навантаження GBR знизилася нижче заданого порогу (порогове значення дезактивації навантаження переповнення GBR), а середня швидкість доставляється до потоків UN вище заданого порогу (порогове значення дезактивації швидкості переповнення ООН). Обидві умови детально описані в таблиці 3.4.

На рисунку 3.10 зображено блок-схеми для обробки запитів потоку UG/MG і UN за стратегією переповнення. Контроль пропуску, застосований у випадку трафіку GBR дотримується тих самих принципів, які використовуються для програми TE на основі SDN.

Параметри:

- Переповнення поріг активації навантаження GBR
- Порогове значення дезактивації навантаження переповнення GBR
- Перевищення порогу активації тарифу ООН
- Поріг дезактивації швидкості переповнення UN AT = Інтервал прийняття рішення про переповнення (с)

Таблиця 3.4.

## Умови перемикання станів і параметрів

Умова переходу стану	Обчислення
З ВИМКНЕНО в УВИМКНЕНО (умова 1)	Рівень навантаження GBR > переповнення поріг активації навантаження GBR АБО Середня швидкість потоку UN < поріг активації переповнення UN швидкість в межах [t, t — AT]
З УВИМКНЕНО у ВИМКНЕНО (умова 2)	Рівень навантаження GBR < поріг дезактивації навантаження переповнення GBR I Середня швидкість потоку ООН > поріг деактивації переповнення швидкості ООН в межах [t, t — AT]

Відповідні обчислення керування допуском для стратегії переповнення детально описано в таблиці 3.5.

**Оцінка ефективності.** Зараз поведінка запропонованої програми TE на основі SDN оцінюється за допомогою чисельного моделювання за різними сценаріями, включаючи ситуації однорідного та неоднорідного навантаження, збої наземного зв'язку в деяких BS та розгортання ряду TBS, які покладаються виключно на супутникову потужність для транспортування.

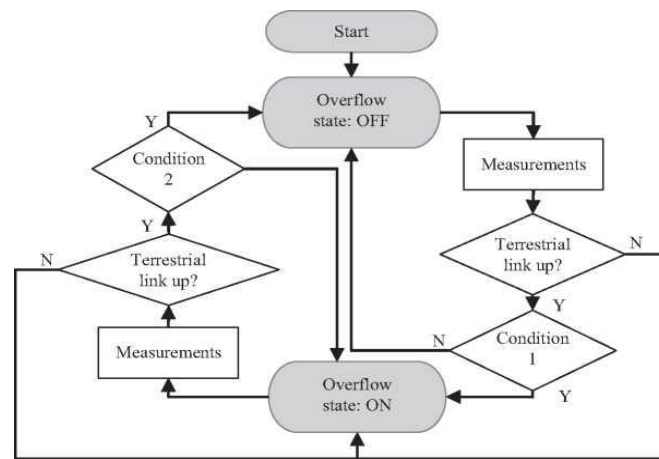


Рис. 3.9 Діаграма стану стратегії переповнення

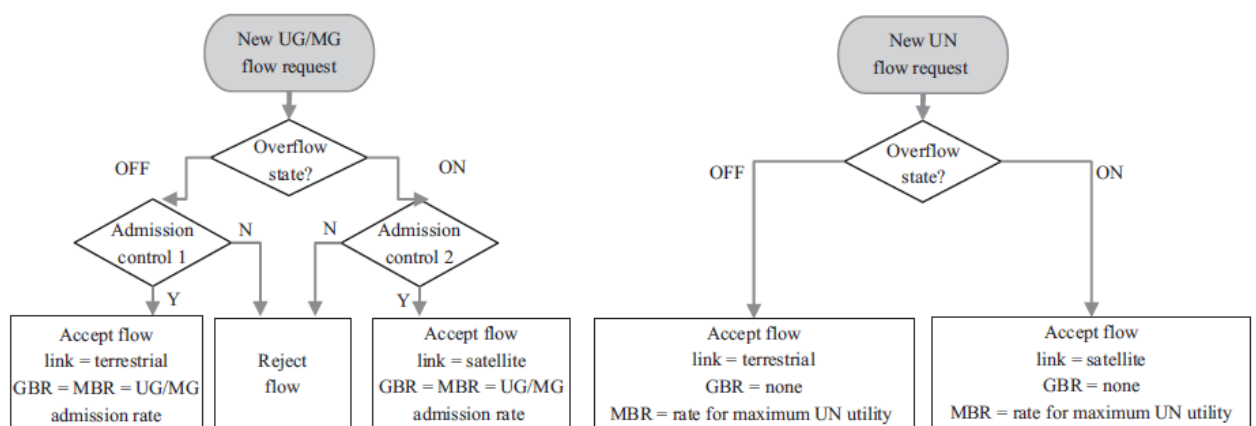


Рис. 3.10 Логіка обробки запитів потоку за стратегією переповнення

Сценарій моделювання розглядає набір BS з наземною та/або супутниковою пропускною здатністю, які обслуговують поєднання потоків UG, MG та UN. Як показано на рівні прийому UG: рівень, який враховується в процесі вступу. Його вибирають із ставок, зазначених для визначення функцій корисності в таблиці 3.1.

Пропускна здатність супутникової системи (CS): Загальна пропускна здатність супутникової системи, яка використовується групою BS.

Зарезервована ємність супутників (Cr): ємність супутників, зарезервована для переважного використання певної BS. Поріг навантаження доступу до GBR: максимальний відсоток доступної (супутникової, наземної, зарезервованої) ємності, який можна використовувати для обслуговування трафіку GBR.

## Обчислення контролю надходження для стратегії переповнення

Приймальний контроль	Опис
Приймальний контроль 1	(Наземне навантаження GBR на рівні BS + UG) < (порогове значення навантаження на GBR • пропускна здатність наземного зв'язку на BS)
Приймальний контроль 2	(GBR супутникове навантаження на рівні BS + UG) < (порогове значення GBR навантаження • пропускна здатність супутникового зв'язку на BS)  I  (Глобальне супутникове навантаження GBR + рівень доступу UG) < (порогове значення навантаження доступу GBR • пропускна здатність супутникової системи)

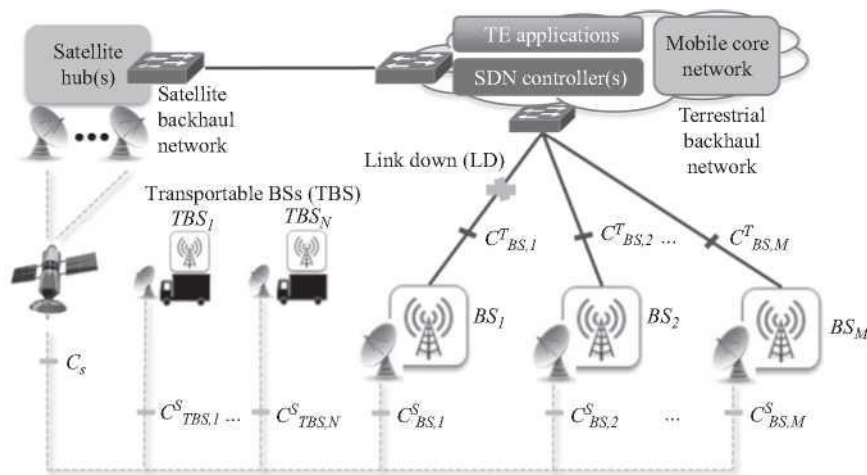


Рис. 3.11. Сценарій розгортання

На рисунку 3.11 є кілька  $M$  BS, розгорнутих у фіксованих місцях як із супутниковими, так і наземними зворотними лініями, а також декілька  $N$  BS, які називаються TBS, які використовуються для тимчасового розгортання/швидкого розгортання мережі, які покладаються лише на використання супутникові канали

зв'язку. У таблиці 3.6 наведено діапазон значень, які розглядаються для загальних параметрів розгортання мережі та конфігурації програми TE на основі переповнення та SDN у чисельній оцінці. Без втрати загальності та заради узгодженості, значення, які розглядаються для характеристики послуг, а також пропускної здатності транзитного зв'язку натхненні сучасними технологіями 4G і супутникового широкосмугового зв'язку. Зокрема, розглянуто налаштування для ємності ефірних каналів (131 Мбіт/с) базується на аналізі розмірів, представленому в [56], щоб впоратися з 90-та відсотками попиту на трафік при розгляді реалістичної моделі трафіку, яка демонструє логарифмічний нормальний розподіл із середнім навантаженням 100 Мбіт/с на BS. Це значення потім розглядається для встановлення діапазону значень CS. З іншого боку, максимальна пропускна здатність супутникового зв'язку на одну базову станцію також встановлена на рівні 210 Мбіт/с відповідно до наземної пропускної здатності та враховуючи, що сучасні найкращі супутникові модеми на основі DVB-S2X можуть дозволити собі цю пропускну здатність. Усі потоки трафіку моделюються пуассонівським прибуттям і експоненціальним розподілом тривалості сеансу. Чисельні результати були отримані шляхом 50-кратного запуску симуляції, керованої подіями, кожна з яких представляє інтервал виконання 1000 с. Значення таблиці 3.6 використовуються як значення за замовчуванням, якщо не зазначено інше.

Таблиця 3.6

## Параметри моделювання

Параметри	Значення
Кількість базових станцій, які спільно використовують супутникову пропускну здатність (N+M)	16
Зворотна ємність	
Пропускна здатність наземного каналу на BS <sub>j</sub> ( $C_j^T$ )	131 Mbps

## Параметри моделювання

Параметри	Значення
Максимальна ємність супутника на BSj ( $C_j^S$ )	210 Mbps
Пропускна здатність супутникової системи ( $C_S$ ) (% від наземної потужності)	10%–20% (209.6–419.2 Mbps)
Характеристика потоків послуг	
Стандартна якість UG бітрейт $R_1^{UG}$	3 Mbps <sup>a</sup>
Високоякісний UG бітрейт $R_2^{UG}$	6 Mbps <sup>a</sup>
Коефіцієнт зниження корисності за рахунок вибору ставки $\alpha_{UG}$	0.8
MG бітрейт $R_1^{MG}$	6 Mbps <sup>a</sup>
Бітрейт UN для максимальної корисності $R_1^{UN}$	13 Mbps <sup>b</sup>
Коефіцієнти зменшення корисності супутника ( $\rho_{UG}$ , $\rho_{MG}$ , $\rho_{UN}$ )	1.0–0.6
Підбір тарифів UG	Тільки висока якість
Параметри стратегії переповнення	
Поріг навантаження на прийом GBR	90%
Поріг активації навантаження переповнення GBR	80%
Поріг дезактивації навантаження переповнення GBR	70%
Переповнення поріг активації UN швидкість	40% of $R_1^{UN}$
Порогове значення дезактивації переповненого рівня ООН	60% of $R_1^{UN}$
Інтервал рішення про переповнення ( $\Delta T$ )	5s

## Параметри моделювання

Параметри	Значення
Параметри програми TE на основі SDN	
Поріг навантаження на прийом GBR	90%
Максимальне резервування потужності на БС	100%
Початкове резервування потужності	20%
Резервування максимальної потужності	95%
Інтервал оновлення повторної оцінки	1 s

**Однорідний просторовий розподіл трафіку.** Ця перша оцінка має на меті показати продуктивність програми TE на основі SDN за умов однорідного розподілу просторового трафіку та враховуючи, що всі BS мають як наземну, так і супутникову пропускну здатність. Навантаження трафіку для послуг UG встановлюється на рівні 30% (низький), 60% (середній) і 90% (високий) пропускну здатності наземної лінії зв'язку в кожній БС. Враховуючи, що потоки UG обслуговуються високоякісною бітовою швидкістю UG RUG, а середня тривалість сеансу становить 30 с, відповідні швидкості надходження потоку  $\lambda_{UG}$  для умов низького, середнього та високого навантаження UG становлять відповідно 0,2183, 0,4366 і 0,655 потоку /с.

Щодо навантаження трафіку ООН, швидкість надходження потоку послуг ООН  $k_{UN}$  змінюється між 0,25 і 1,0 на кожній BS. Це призводить до того, що середня кількість активних потоків UN на BS становить від 7,5 до 30 на BS, враховуючи середню тривалість сеансу 20 с. Зауважте, що якби всі потоки UN могли обслуговуватися на R1UN, це означало б середнє навантаження UG на BS від 65 до 260 Мбіт/с. У цьому першому результаті не враховується багатоадресний трафік.

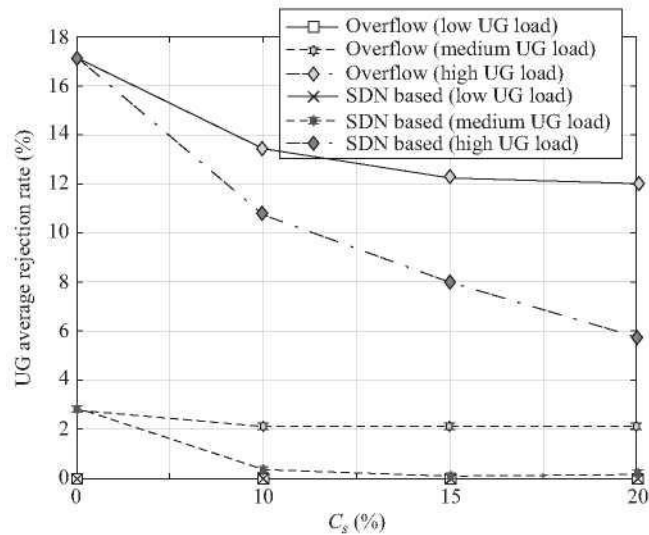


Рис. 3.12. Рівень відхилень у допуску для послуг UG

На рисунку 3.12 показана частота відхилень у допуску, з якою стикається трафік UG за стратегіями на основі SDN і переповнення для різних обсягів  $C_s$  і при розгляді коефіцієнта зменшення корисності супутника, заданого  $p_{UG} = p_{UN} = 1$ . Можна побачити, як доступність пропускна здатність супутника призводить до значного зниження рівня відхилень для трафіку UG і тому, як рішення на основі SDN явно перевершує стратегію переповнення. Для середнього навантаження UG програма TE на основі SDN зберігає коефіцієнт блокування значно нижче 0,5% із лише  $C_s = 10\%$ , тоді як стратегія переповнення не може зменшити його з 2,0%.

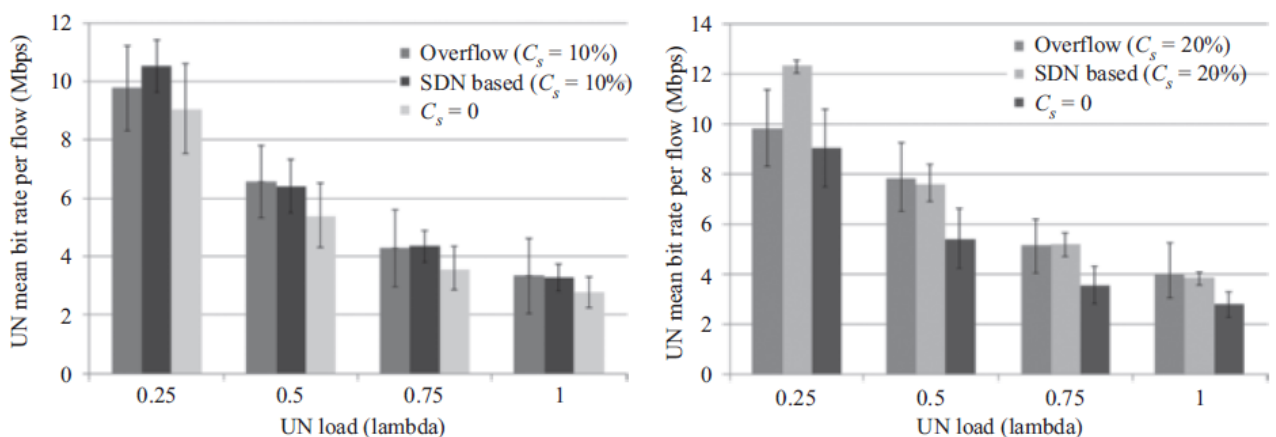


Рис. 3.13. Середня бітова швидкість UN на потік для  $C_s = 10\%$  (ліворуч) і  $C_s = 20\%$  (праворуч)



Зосереджуючись тепер на показниках продуктивності служби ООН, на рисунку 3.13 показано середнє значення та стандартне відхилення швидкості передачі даних, що доставляється на один потік ООН, для різних навантажень ООН і враховуючи значення  $CS = 10\%$  і  $CS = 20\%$ . Результати отримано для середнього трафіку UG,  $pUG = pUN = 1$  і додається випадок із  $CS = 0\%$ .

Зосереджуючись тепер на показниках продуктивності служби ООН, на рисунку 3.13 показано середнє значення та стандартне відхилення швидкості передачі даних, що доставляється на один потік ООН, для різних навантажень ООН і враховуючи значення  $CS = 10\%$  і  $CS = 20\%$ . Результати отримано для середнього трафіку UG,  $pUG = pUN = 1$  і додається випадок із  $CS = 0\%$ .

Рисунок 3.13 Середня бітова швидкість UN на потік для  $CS = 10\%$  (ліворуч) і  $CS = 20\%$  (праворуч) для цілей порівняння. Як видно на малюнку, досягнуті середні бітові швидкості не змінюються суттєво при порівнянні стратегії на основі SDN і стратегії переповнення, хоча підхід на основі SDN явно перевершує ефективність у менш навантажених ситуаціях. Це пов'язано з тим, що за високих навантажень трафіком використовується майже вся пропускна здатність зворотного зв'язку (супутникова та наземна), оскільки потоки трафіку ООН в кінцевому підсумку використовують всю доступну пропускну здатність, і в середньому частка пропускну здатності на потік практично однакова. Однак найвідоміша різниця виникає при спостереженні за значеннями стандартного відхилення, які значно зменшуються завдяки стратегії на основі SDN. Це пов'язано з тим, що ця стратегія розподіляє трафік на основі глобальної зайнятості як супутникових, так і наземних каналів зв'язку, шукаючи справедливості між усіма встановленими ООН потоками, що, зрештою, призводить до вищої корисності мережі.

Продуктивність мережі з точки зору мережевої корисності представлена на рисунку 3.14. Ліворуч наведено середні корисності на BS в абсолютних значеннях для SDN і стратегій переповнення за різних значень CS. Результати отримано для середнього навантаження на трафік UG,  $pUG = pUN = 1$  і випадок із  $CS = 0\%$

додається для порівняння. Можна побачити, що стратегія SDN забезпечує найвищу корисність у всіх ситуаціях. Заглиблюючись у деталі, приріст корисності, обчислений як збільшення відсотка глобальної корисності, досягнута SDN, і стратегії переповнення по відношенню до досягнутої для випадку з  $C_S = 0$ , представлені в правій частині малюнка. Тут можна помітити, що, наприклад, стратегія SDN може забезпечувати такий самий або навіть більший приріст корисності при роботі з  $C_S = 10\%$  (або  $15\%$ ), ніж стратегія переповнення для  $C_S = 15\%$  (або  $20\%$ ). Додаткові результати, не зображені на малюнку, показують, що стратегія SDN все ще здатна принести деякий приріст корисності, якщо врахувати коефіцієнти зниження корисності набагато нижче 1,0 (наприклад, приріст 4% для  $C_S = 20\%$ , коли  $p_{UG} = p_{UN} = 0,6$ ).

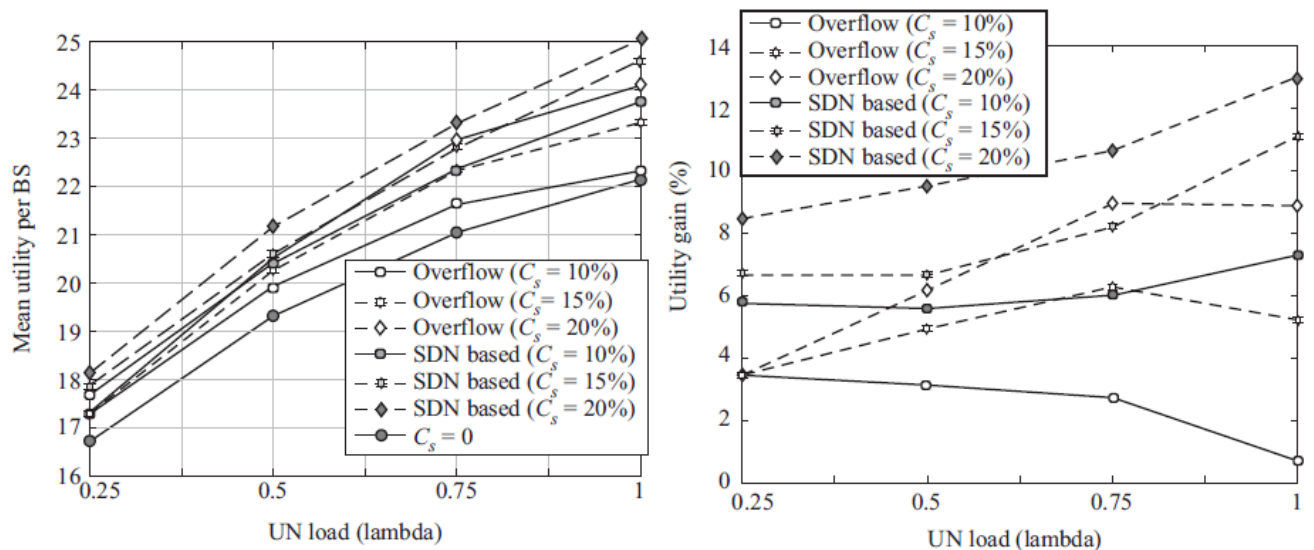


Рис. 3.14. Корисність (ліворуч) і приріст корисності (праворуч) на BS

Вища корисність, досягнута стратегією SDN, частково пояснюється механізмом перерозподілу, який розглядається як частина програми TE. У зв'язку з цим було оцінено, що кількість перерозподілів, які в середньому може зазнати потік ООН, зберігається в діапазоні 0,26-0,65 залежно від навантаження на трафік UG і UN і має тенденцію до зменшення зі збільшенням трафіку ООН.

Нарешті, результати продуктивності надаються з урахуванням багатоадресного трафіку. У цьому відношенні передбачається, що сеанс MG пересилається в середньому до шести BS. Навантаження одноадресного трафіку

встановлено на середнє навантаження для послуг UG ( $kUG = 0,43$ ), а потоки UN генеруються з  $kUN = 0,75$  потоків/с. Багатоадресне навантаження фіксується у відсотках від навантаження UG. Коефіцієнт зменшення корисності супутника встановлюється на  $pUG = pUN = pMG = 0,8$  для всіх послуг, а в додатках TE на основі SDN розглядаються дві стратегії розподілу багатоадресного трафіку: одна стратегія спрямована на максимізацію корисності MG, а інша — на мінімізацію споживання ресурсів потоками MG. На рисунку 3.15 показано середню корисність, досягнуту на BS (ліва сторона), і середню швидкість передачі даних, що доставляються до потоків UN (права сторона). Як видно з цифр, стратегія, спрямована на мінімізацію споживання ресурсів для трафіку, працює набагато краще за двома показниками ефективності. Причина полягає в тому, що мінімізація споживання ресурсів змушує більшу частину трафіку MG передавати через супутник, надаючи більше ресурсів доступним для послуг UG і UN, які в кінцевому підсумку можуть отримати вищі корисності та бітрейти. Хоча це не зазначено в цифрах, отриманий середній рівень відхилення UG знаходиться в діапазоні 0,2%-0,5% для стратегії мінімізації споживання ресурсів на відміну від 0,4%-1,6% для стратегії, яка максимізує корисність MG.

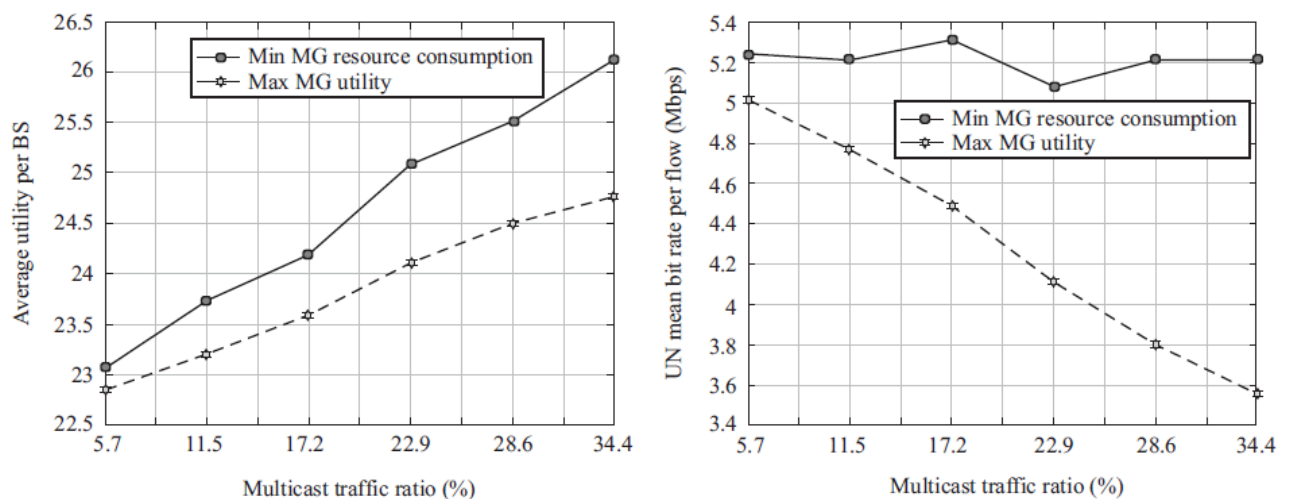


Рис. 3.15. Стратегії обробки багатоадресного трафіку – мережева утиліта (ліворуч) і середня швидкість передачі даних ООН (праворуч)

**Неоднорідний просторовий розподіл трафіку.** Давайте тепер розглянемо випадок, коли трафік не є рівномірно розподіленим між BS. Зокрема, ми припускаємо, що половина BS, позначена як група 1, піддається навантаженню UN, що характеризується  $k_{UN} = (1/2) \cdot 0,75$  потоків/с, а інша половина, позначена групою 2, – UN. навантаження з  $k_{UN} = (3/2) \cdot 0,75$  потоків/с. Крім того, усі BS підтримують середнє навантаження UG, а CS встановлено на 20%. За такої конфігурації навантаження на рисунку 3.16 наведено середнє (ліворуч) і стандартне відхилення (праворуч) швидкості передачі даних, досягнутої для потоку UN. Результати наведені окремо для двох груп BS, для всіх BS у сценарії та, для порівняння, для всіх BS під однорідним навантаженням з  $k_{UN} = 0,75$  потоків/с. Спостерігається, що в групі 1 середня бітова швидкість, яку забезпечує стратегія переповнення, дещо вища, ніж досягнута стратегією SDN. З іншого боку, ця ситуація є протилежною для BS у групі 2 і при розгляді загального набору BS. Це в основному відображає більш справедливий розподіл супутникової пропускної здатності, що забезпечується програмою TE на основі SDN, що стає ще більш очевидним при порівнянні значень стандартного відхилення швидкості передачі даних.

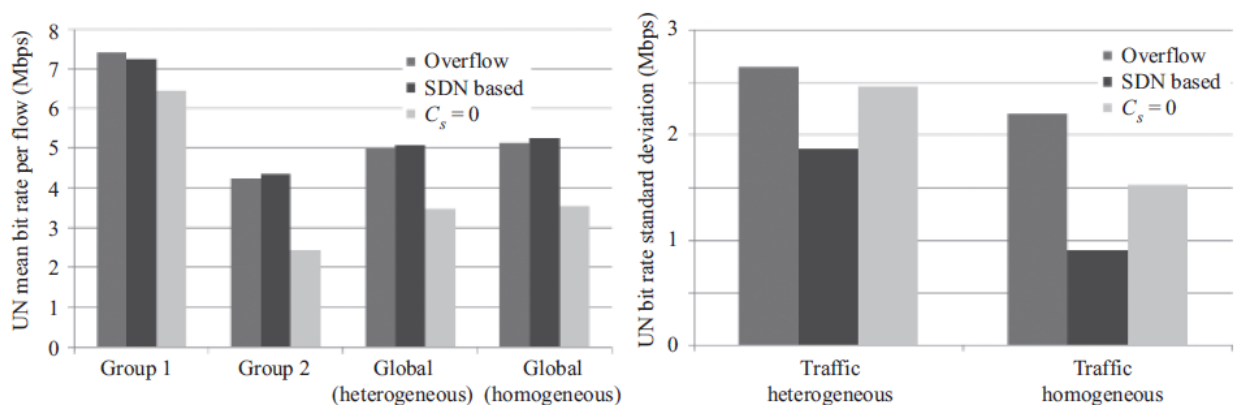


Рис. 3.16. Середнє (ліворуч) і стандартне відхилення (праворуч) швидкості передачі даних, досягнутої за потік ООН

На рисунку 3.17 представлено продуктивність мережі для різних наборів BS з точки зору корисності мережі на BS. Як спостерігалось, додаток TE на основі SDN може досягти вищої корисності в найбільш завантажених базових станціях (група 2) і, як наслідок, більш високої продуктивності в глобальному сценарії.

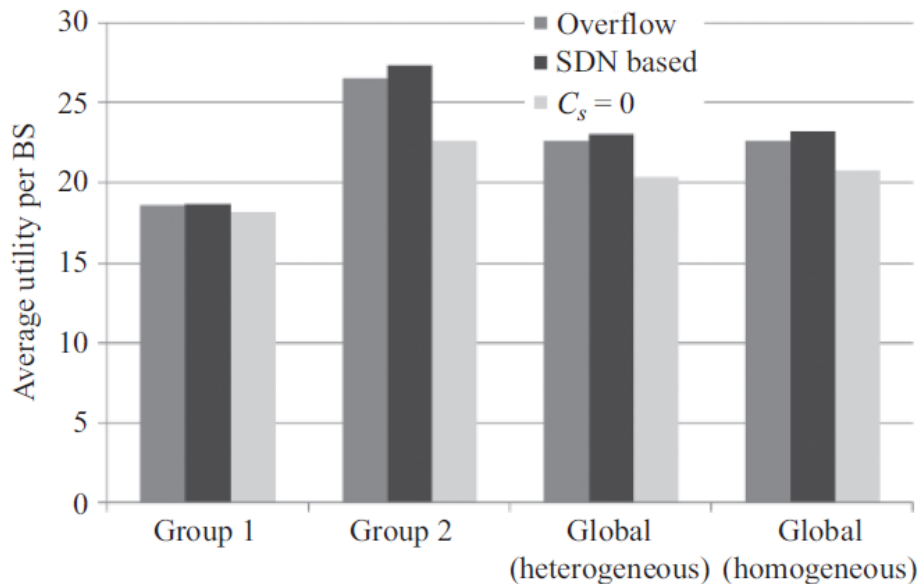


Рис. 3.17 Середня корисність на БС

**Супутникове резервне копіювання на випадок збоїв наземного зв'язку та мобільних базових станцій.** Ця оцінка показує продуктивність програми TE на основі SDN, коли є одна BS без доступності наземного зв'язку в наборі з  $N+M=16$  BS, які спільно використовують той самий пул супутникової потужності. Це може бути випадок BS, яка тимчасово стикається з відсутністю доступності наземного зв'язку, і супутникова пропускна здатність використовується як резервна, або випадок TBS, яка покладається виключно на супутникову пропускну здатність для зворотного зв'язку. Умови моделювання враховують середнє навантаження UG та навантаження UN, що характеризуються  $kUN = 1$  потік/с. CS встановлено на 20%, а коефіцієнт зменшення корисності супутника становить 1,0 для всіх послуг.

Отримані результати щодо коефіцієнта відмови у допуску для послуг UG наведено на рисунку 3.18 (ліворуч). Результати надаються окремо для БС без наземної потужності та для решти БС у сценарії. Крім того, для цілей порівняння, рисунок 3.18 (ліворуч) також враховує випадок із  $CS = 0\%$  і випадок, коли всі

наземні канали зв'язку повністю працездатні. Як видно з малюнка, завдяки схемі керування резервуванням, вбудованій у програму TE на основі SDN, рівень відхилень може бути повністю зменшений у BS без наземної потужності, тоді як за стратегії переповнення рівень відхилень лише незначно зменшується.

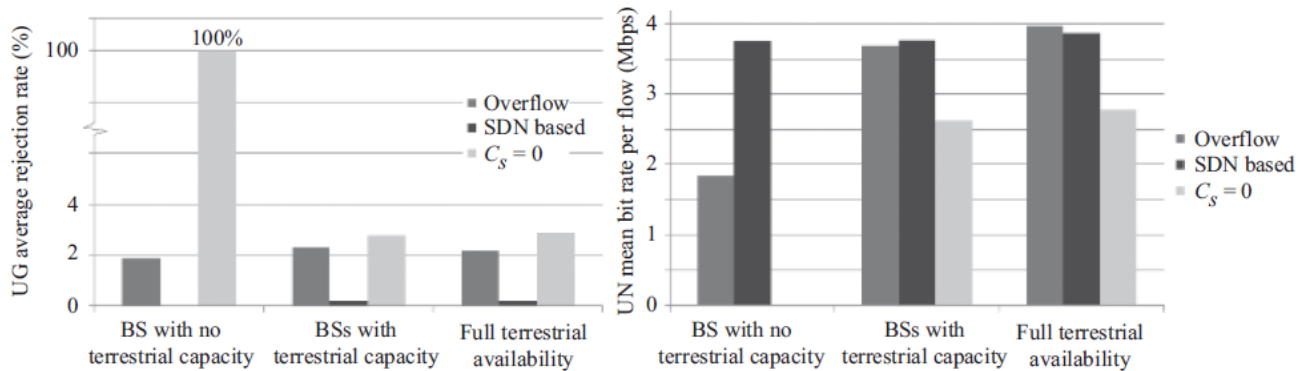


Рис. 3.18. Коефіцієнт відхилень у допуску для послуг UG у разі збою наземного зв'язку (ліворуч), середня швидкість передачі даних на потік ООН під час збою наземного зв'язку (праворуч)

Одна з найбільш помітних відмінностей спостерігається в середній швидкості передачі даних ООН, показаній на рисунку 3.18 (справа). На рисунку представлено середнє значення швидкості передачі даних, що доставляється до потоків ООН, що обслуговуються через BS без наземної пропускної здатності, через решту BS з наземною пропускною здатністю та в сценарії без будь-якої відмови зв'язку. Як видно на рисунку 3.18 (справа), середня швидкість передачі даних UN, досягнута програмою TE на основі SDN, подвоюється, ніж отримана за стратегії переповнення в порушеній BS. Це покращення пов'язано з застосовністю схеми керування резервуванням у програмі TE на основі SDN, яка гарантує, що BS без наземної потужності може забезпечити достатню супутникову пропускну здатність, щоб запропонувати середню швидкість передачі даних ООН, порівнянну з передачею через інші BS.

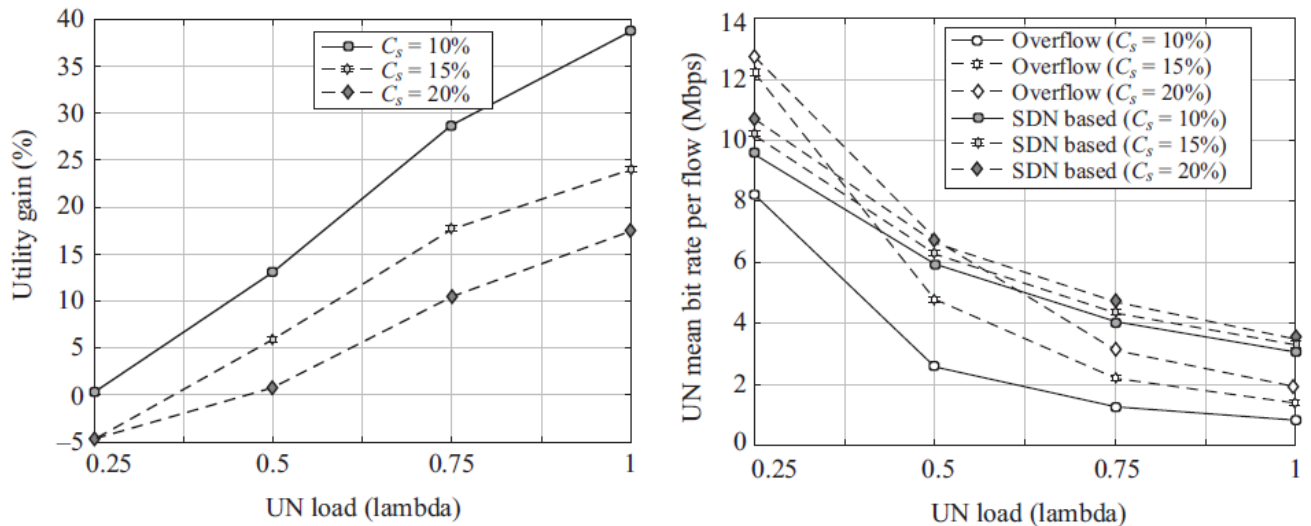


Рис. 3.19. Приріст корисності завдяки стратегії на основі SDN у порівнянні зі стратегією переповнення на базовій станції без доступності наземного каналу (ліворуч), середня швидкість передачі даних за потік на базовій станції без доступності наземного зв'язку (праворуч)

Зосереджуючись тепер на продуктивності BS без наземної пропускної здатності, на рисунок 3.19 представлені додаткові результати для різних навантажень ООН ( $kUN = 0,25, 0,5, 0,75$  і  $1,0$  потоків/с) і різних кількостей CS (10%, 15%, 20%). Навантаження UG встановлено на середнє навантаження, а коефіцієнт зменшення корисності супутника встановлено на 1,0 для всіх послуг. За цих умов рисунок 3.19 (ліворуч) показує приріст корисності, обчислений тут як відсоток збільшення глобальної корисності, отриманої стратегією на основі SDN, порівняно зі стратегією переповнення. Зауважте, що підвищення корисності досягає 40% в умовах високого навантаження. Це покращення може досягати навіть 85%, якщо умови навантаження UG встановлені на високі замість середніх. Аналогічно, рисунок 3.19 (справа) показує, що стратегія на основі SDN може підтримувати швидкість передачі даних ООН значно вище стратегії переповнення, коли навантаження на ООН зростає.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі цієї магістерської роботи було досліджено новітні технології супутникового зв'язку, зокрема актуальність тих чи інших технологій супутникового зв'язку на даний момент, що з них більше підходить для інтеграції у вже наявну систему та останні й найбільш актуальні досягнення у цій сфері.

У другому розділі було проаналізовано технології, що придатні для реалізації в умовах наявної мережі у найближчому майбутньому, а саме особливості застосування супутників з підтримкою SDN для супутниково-земної інтеграції, основи її архітектури та особливості супутникової архітектури в цілому і ще не менш важливе питання що до способів передачі даних в цій архітектурі.

У третьому розділі було досліджено два найбільш доступних та швидких способи інтеграції супутниково-земної системи зв'язку у вже наявну мережеву інфраструктуру, проведено необхідні розрахунки та переглянуто деякі підходи.

Підсумовуючи всі думки, що були описані раніше еволюція супутникових мереж у бік відкритих архітектур на основі технологій SDN і NFV є необхідним кроком не лише для того, щоб перенести в супутниковий домен переваги, пов'язані з досягненнями в технологіях м'якої зміни мережі, які консолідується в ландшафті 5G, але й для значного полегшення безперебійної інтеграцію та роботи комбінованих супутникових і наземних мереж. Автор детально описав підтримку концепцій і технологій SDN у супутникових мережах і розробив тематичне дослідження застосовності рішень TE на основі SDN для керування супутниковим компонентом, інтегрованим у мережі мобільного зв'язку наступного покоління. Дослідження охоплювало архітектурні аспекти для реалізації таких рішень разом із специфікацією та оцінкою продуктивності прикладної програми TE на основі SDN.

Що стосується архітектурних аспектів, то на основі функціональної архітектури ETSI для систем BSM було запропоновано рішення для прийняття архітектури SDN у супутниковій мережі. Рішення базується на запровадженні контролера SDN, який керує послугами підключення через супутникову мережу



на основі SDN і використовує такі інтерфейси: (1) SBI для M&C функцій взаємодії та адаптації в шлюзових ST і потенційно також ST користувача; (2) SBI для M&C несучих послуг BSM і, можливо, також деяких можливостей у нижніх рівнях SD (супутникові ресурси, такі як частотний план, схеми модуляції та кодування або інші специфічні властивості супутника) і (3) NBI для M&C послуги супутникової мережі надходять із мережевих додатків на контролері SDN або із зовнішніх контролерів. Були обговорені можливі моделі даних SDN і протоколи для реалізації архітектури супутникової мережі на основі SDN, а саме моделі ETSI BSM SI-SAP, ONF OF, ONF Microwave Information Model, ONF T-API і IETF YANG для мереж та інженерного трафіку. На цій основі було представлено інтеграційний підхід до реалізації TE на основі E2E SDN у супутниково-наземних мережах транзитного зв'язку, у якому супутниковий компонент абстрагований як комутатор OF. Для перевірки запропонованого інтеграційного підходу було розроблено два центральні робочі процеси TE.

Далі було сформульовано програму TE на основі SDN, яка базується на глобальному уявленні про ресурси гібридної наземно-супутникової мережі та використовує комбінацію функцій керування та критеріїв, таких як (1) обчислення шляху E2E із вибором наземного чи супутникового каналу зв'язку; (2) резервування ресурсів пропускної здатності супутника для роботи з BS без або з обмеженою пропускною здатністю наземного зв'язку; (3) різні критерії розподілу залежно від характеру трафіку (сервіси GBR і не-GBR, одноадресні/багатоадресні); (4) допуск і контроль швидкості, щоб протистояти перевантаженню та гарантувати ресурси та мінімальні (обов'язані) швидкості передачі на потік і групу потоків і (5) критерії максимізації корисності, де адекватність обробки конкретних потоків через наземний або супутниковий зв'язок враховується компонент, а також ефект розподілу більшої чи меншої швидкості передачі даних. Було проведено детальний аналіз продуктивності, щоб оцінити поведінку запропонованої програми TE на основі SDN у багатьох і різноманітних сценаріях, включаючи однорідні та неоднорідні ситуації навантаження з BS, які використовують як супутникову, так і наземну пропускну

здатність, збої наземного зв'язку в деякі з BS та розгортання ряду мобільних TBS, які покладаються виключно на супутникову потужність для зворотного зв'язку. Для порівняння було розглянуто більш традиційну стратегію переповнення. Як загальні тенденції, було продемонстровано, як запропонована програма TE на основі SDN здатна забезпечити більш високу мережеву корисність у більшості проаналізованих випадків, значно покращуючи коефіцієнт відхилення доступу для послуг GBR і досягаючи більшої справедливості в розподілі швидкості передачі даних. для не-GBR потоків.

Підсумовуючи, концепції та результати, представлені в цьому розділі, чітко свідчать про необхідність оснащення наступного покоління супутникові мережі з набором функцій керування та керування та інтерфейсами (API та/або мережевими протоколами), сумісними з основними архітектурами та технологіями SDN, які застосовуються в 5G, щоб реалізувати повну мережеву концепцію E2E, де комбінована послуга супутникової та наземної мережі можуть бути розгорнуті та експлуатовані гнучким і послідовним способом. Це закладає основу для розгортання інноваційних програм SDN, націлених, наприклад, на підвищення ефективності використання ресурсів, ефективний і швидкий захист і відновлення та автоматизація мережевого планування та роботи в мережевих інфраструктурах, що охоплюють наземні та супутникові ресурси. Крім того, хоча рішення на основі SDN, яке досліджується в цій главі, зосереджено виключно на наземному сегменті систем супутникового зв'язку, слід також вивчити динамічну взаємодію з гнучкими супутниковими корисними навантаженнями для більш ефективного управління ресурсами по всьому ланцюгу супутникового зв'язку.