

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“Методи оптимізації РРЛ мережі оператора мобільного зв'язку на основі ПАК "Atoll"”**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61  
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Горохов О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФУНКЦІОНУВАННЯ НАЗЕМНИХ СУПУТНИКОВИХ ТА БЕЗПЛОТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Поняття, різновиди телекомунікацій та їх функціональні задачі.....	7
1.2. Особливості телекомунікаційних рішень для наземних та безпілотних апаратів.....	11
1.3 Обґрунтування потреби в інноваційних рішеннях в умовах активного використання БПЛА.....	24
<b>РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОНВЕРГЕНЦІЇ НАЗЕМНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....</b>	<b>33</b>
2.1 Сутність та завдання конвергенції наземного та повітряного бездротового зв'язку.....	33
2.2 Огляд існуючих методів конвергенції наземних та повітряних телекомунікацій.....	36
2.3 Вимоги до архітектури телекомунікаційних рішень в залежності від методу конвергенції.....	46
<b>РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ РІЗНИХ МЕТОДІВ КОНВЕРГЕНЦІЇ НА ЯКІСТЬ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ.....</b>	<b>59</b>
3.1 Порівняльний аналіз застосування методів конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень.....	59
3.2 Застосування отриманих результатів для вдосконалення бездротового зв'язку і управління БПЛА.....	62
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>81</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>83</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>90</b>

## ВСТУП

Сучасна епоха світового суспільно-економічного розвитку характеризується формуванням нового типу суспільства - інформаційного, де інтелектуальний капітал у вигляді знань та інформації відіграє провідну, визначальну роль основного чинника виробництва, а обмін останніми здійснюється за допомогою засобів телекомунікації. Телекомунікаційна галузь є однією з відносно нових галузей економіки, що заснована на технологічних досягненнях у сфері зв'язку та обчислювальної техніки [1-2, 4-5]. Це і авторизація кредитних карток, і передавання телеметричних даних, і охоронна сигналізація, і організація платежів населення, і забезпечення міжстанційних зв'язків між базовими станціями систем персонального виклику, і електронна та голосова пошта, і телевідеоконференцзв'язок, і доступ до Інтернет, і комп'ютерна телефонія [3].

**Актуальність дослідження.** На даний час з'явилися напрями досліджень в області об'єднання гетерогенних технологій, включаючи наземні бездротові, волоконно-оптичні та неназемні (супутникові, стратосферні, безпілотні) системи зв'язку. Об'єднання таких технологій із використанням міліметрового діапазону хвиль може забезпечити високу пропускну здатність і широкий географічний обхват, незважаючи на дуже великі відстані передачі і сильне загасання на цих частотах [8]. Також дослідникам стало зрозуміло, що для реалізації супутникового інтернету необхідно створення повністю інтегрованих неназемних і наземних мереж. Тому буде доцільним проаналізувати можливі варіанти архітектури таких багаторівневих в фізичному плані телекомунікаційних систем, визначити технологічні та фізичні обмеження за площею покриття, пропускну здатністю, іншими параметрами та можливостями. Представлене дослідження присвячене аналізу методів конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень.

**Ступінь розробки теми.** Комплексному дослідженню сутності наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень при здійсненні

керування БПЛА присвятили свої роботи такі вітчизняні та іноземні фахівці як: Абдуллазаде Ф. З. [6], Васильєв В. М. [12], Климаш М. М. [30], Бурячок В. Л. [9], Зав'ялов А. В. [22], Гілленберг О. С. [17], Маньківський В. Б. [38], Жураковський Б. Ю. [51], Трояновська Т. І. [45], Маньківський В. Б. [53], Федотов Е. Д. [47].

**Мета роботи** – дослідити методи конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень за рахунок правильної оцінки ефективності прийнятих рішень і вибору раціонального варіанту створення комплексів телекомунікаційних систем зв'язку між безпілотними апаратами та реалізації системи захисту каналів передачі даних.

**Об'єкт дослідження** – особливості телекомунікаційних рішень для наземних та безпілотних апаратів.

**Предмет дослідження** – сутність та завдання конвергенції наземного та повітряного бездротового зв'язку. Методи дослідження: статистичний аналіз, метод багатокритеріального аналізу, методика та алгоритм конвергенції системи наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень.

**Завдання дослідження** можна сформулювати так:

- проаналізувати поняття, різновиди телекомунікацій та їх функціональні задачі;
- назвати особливості телекомунікаційних рішень для наземних та безпілотних апаратів;
- дати обґрунтування потреби в інноваційних рішеннях в умовах активного використання БПЛА;
- розкрити сутність та завдання конвергенції наземного та повітряного бездротового зв'язку, здійснити огляд існуючих методів конвергенції наземних та повітряних телекомунікацій;
- назвати вимоги до архітектури телекомунікаційних рішень в залежності від методу конвергенції;
- привести порівняльний аналіз застосування методів конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень;

– розглянути застосування отриманих результатів для вдосконалення бездротового зв'язку і управління БПЛА.

**Методи дослідження:** теоретичний аналіз наукової літератури; аналіз та узагальнення. Статистичні дані та порівняння. Класифікація теоретичного матеріалу та розробка рекомендацій.

У процесі роботи, залежно від поставлених цілей і завдань, використовувалися відповідні методи аналізу: структурного і системного, порівняльного і факторного аналізу, які ґрунтуються на застосуванні основних принципів логічних та статистичних методів оцінки первинного матеріалу.

**Новизна дослідження.** Зроблено широкий літературний пошук з детальним аналізом наукової інформації. Проведено систематизацію та адаптацію отриманих літературних результатів. Зроблено рекомендації для покращення існуючої системи керування БПЛА.

**Структура роботи.** Відповідно до мети і завдань дослідження структура дипломної роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури. За час роботи опрацьовано 64 літературних джерел. Зміст дипломної роботи викладено на 95 сторінках машинописного тексту.

**Джерелами інформації** для вирішення перерахованих вище завдань є збірники наукових праць, монографії, періодична література, підручники та довідники, періодичні фахові журнали.

## РОЗДІЛ 1.

### ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФУНКЦІОНУВАННЯ НАЗЕМНИХ СУПУТНИКОВИХ ТА БЕЗПЛОТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

#### 1.1. Поняття, різновиди телекомунікацій та їх функціональні задачі

Міжнародний досвід дозволяє стверджувати, що одним із основних чинників, що впливатиме на розбудову національної економіки, побудову в Україні інформаційного суспільства, на процес інтеграції України в ЄС та у світову економіку, є прискорений розвиток телекомунікацій. У світовій практиці при дослідженні рівня розвитку інформаційного суспільства і виконанні регіонального порівняльного аналізу використовується Індекс розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ) (ICT Development Index, IDI) [10].

IDI є загально визнаним комбінованим показником, який характеризує досягнення країн світу з погляду розвитку ІКТ. Він використовується як показник та інструмент моніторингу загальних процесів, що характеризують досягнутий країнами прогрес у напрямі побудови інформаційного суспільства. Тому уточненню сутності поняття «телекомунікація» в поглядах науковців, їх різновиди та основні задачі ми присвятимо даний параграф нашої роботи.

Загальне поняття «телекомунікації» базується на уявленні про технічні засоби, що дозволяють організувати зв'язок між двома і більше віддаленими об'єктами. Секція телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (Telecommunications Standardization Sector of International Telecommunications Union, ITU-T) у Рекомендаціях серії I (I.110, I.112) визначає термін «телекомунікації» як сукупність засобів, які забезпечують перенесення інформації, поданій у необхідній формі, на значну відстань за допомогою поширення сигналів в одному з середовищ (міді, оптичному волокні, ефірі) або сукупності середовищ [15].

Засобами, визначеними загальним поняттям «засоби телекомунікацій», є лінії зв'язку, пристрої з'єднання середовищ, системи передачі, комунікаційні пристрої мережі, обладнання сигналізації, синхронізації тощо. Виходячи з цього визначення, телекомунікаційна мережа – це системоутворююча сукупність засобів телекомунікацій, що надає територіально віддаленим об'єктам можливість інформаційної взаємодії шляхом обміну сигналами (електричними, оптичними або радіо). Об'єктами при цьому можуть виступати як термінальні пристрої користувачів та кінцеві системи мережі, так і окремі мережі [11].

Як зазначав Жураковський Б. Ю. [51] комунікації і телекомунікації – це засоби обміну інформацією, її смисловим значенням між двома і більше суб'єктами. Теле – це початкова частина складених слів, що означає дальність, дію на великій відстані (походить від грецького слова «τηλε» – далеко). Таким чином, телекомунікації – це процес передачі й обміну інформацією на відстані між різними суб'єктами.

Трояновська Т. І. [45] вбачає в понятті «комунікації» чотири групи значень:

1. основа людської діяльності та різноманітні форми мовної діяльності;
2. інформаційний обмін в технологічно організованих системах;
3. мислекомунікація, інтелектуальний процес, що має витриманий ідеально-змістовний план та пов'язаний з певними ситуаціями соціальної дії;
4. екзистенціальну комунікацію, як акт виявлення «Я в Іншому».

Телекомунікаційні мережі є досить високоорганізованою частиною інфраструктури сучасного суспільства. При цьому, маючи високі показники надійності, стабільності, пропускну здатності, швидкості передачі, безпеки, телекомунікаційні мережі повинні гарантувати достовірну високоякісну передачу необхідної інформації в будь-який час доби між будь-якими географічними точками. У процесі своєї еволюції будь-яка технічна система досягає такого етапу життєвого циклу, коли резерви її подальшого розвитку

обумовлюються ступенем і якістю використання досягнень у сфері інформаційних технологій [28].

Таким чином, телекомунікаційна мережа – це системоутворююча сукупність засобів телекомунікацій, що надає територіально віддаленим об'єктам можливість інформаційної взаємодії шляхом обміну сигналами (електричними, оптичними або радіо). Приклад телекомунікаційної мережі наведено в додатку даної роботи.

Об'єктами телекомунікаційної мережі можуть виступати як термінальні пристрої користувачів, кінцеві системи мережі й окремі мережі. Кінцем, інтерфейсною точкою, телекомунікаційної мережі є або мережевий інтерфейс або міжмережевий інтерфейс.

Процес конвергенції, який відбувається у сфері інформатизації та телекомунікацій, зумовив появу терміну «інфокомунікації». Поняття інфокомунікацій містить у собі такі основні елементи, як: мережу, мережеві технології, послуги, технології створення послуг. Конвергенція спричинила утворення поняття «контенту» та появу нової індустрії інформаційного наповнення мережі (виробники та дистриб'ютори контенту, контентпровайдери та контент-агрегатори) [25].

За типом середовища передачі інформації розрізняються кабельні та бездротові системи. У кабельних потоки інформації йдуть по металевих та волоконно-оптичних кабелях, бездротові функціонують із використанням радіорелейного і супутникового зв'язку. Пункти, куди інформація надходить або звідки виходить, називають терміналами.

За територіальним охопленням телекомунікаційні системи поділяються на локальні, регіональні, країн і глобальні. Глобальна мережа об'єднує телефонні мережі загального користування, мережу передачі даних, системи мобільного та супутникового зв'язку, а також охоплює значну географічну область, часто цілу країну або навіть континент [48]. Регіональні мережі та корпоративні мережі – це мережі, що об'єднують комп'ютери в межах одного регіону або одного підприємства. Локальні мережі – приватні мережі,



розміщуються, як правило, в одній будівлі або на території будь-якої організації. Їх часто використовують для об'єднання комп'ютерів й робочих станцій в офісах компанії або підприємства для надання спільного доступу до ресурсів (наприклад, принтерами) та обміну інформацією.

За характером реалізованих функцій телекомунікаційні системи поділяються на обчислювальні, які передбачають оброблення інформації користувача та інформаційні – відносно отримання довідкової інформації за запитом користувача.

За способом управління телекомунікаційні системи поділяються на централізовані – в мережі є один або кілька центрів управління; та децентралізовані – єдиного центру управління немає, мережею управляє одноразово та робоча станція, яка передає дані. Сучасні телекомунікаційні системи включають у себе всі види мереж електричного зв'язку. Телекомунікаційні системи як функціонуюча мережа являють собою сукупність радіоелектронних технічних засобів для передачі інформації та даних на відстань.

Таким чином, зв'язок БПЛА можна класифікувати на чотири основних типи: БПЛА-БПЛА (D2D), БПЛА до наземної станції (D2GS), БПЛА до мережі (D2N) і БПЛА до супутника (D2S).

Основними різновидами телекомунікацій є такі:

1. Безпілотний зв'язок. Така комунікація ще не стандартизована. Насправді, машинне навчання можна використовувати для розробки та оптимізації інтелектуальної системи бездротового зв'язку на базі БПЛА. У більшості випадків комунікація «безпілотний зв'язок» (D2D) може бути змодельований як підключення Peer-to-Peer (P2P). Це зробить його вразливим для різних типів атак P2P, включаючи такі як відмова в обслуговуванні (D-DoS) та атаки sybil [7].

2. Наземний зв'язок. Цей тип зв'язку базується на вже відомих та стандартизованих протоколах, які базуються на бездротових комунікаціях, таких як Bluetooth та Wi-Fi 802.11, включаючи 2,4 ГГц та 5 ГГц. Однак більшість

дронів, які комунікують наземним зв'язком, можуть стати вразливими до пасивних (підслуховування) та активних (людина всередині) атак.

3. Стільниковий зв'язок. Цей тип зв'язку дозволяє вибрати мережу, виходячи з необхідного рівня безпеки. Він також може включати стільниковий зв'язок, що означає покладання на 3 ГГц, 4 ГГц, 4G + (LTE) та 5 ГГц. Важливо забезпечити захист таких мереж бездротового зв'язку під час використання.

4. Супутниковий зв'язок. Це тип зв'язку, необхідний для надсилання координат у реальному часі через GPS. Це дозволяє будь-якому БПЛА викликати його назад до початкової станції у випадку, якщо він вийшов за лінію управління або поза лінію зору. Супутниковий зв'язок вважається захищеним і безпечним. Однак пред'являє високу вартість та вимоги до обслуговування. Ось чому даний тип зв'язку широко використовуються збройними силами [12].

Таким чином, сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології стирають розходження між традиційно поділюваними секторами інформаційної індустрії: телефонією, телекомунікаціями, кабельними мережами, телемережами, супутниковим і ефірним мовленням тощо. Обсяг інформації, що циркулює в Інтернеті, перевищує всі наявні ресурси в звичайних засобах масової інформації.

## **1.2. Особливості телекомунікаційних рішень для наземних та безпілотних апаратів**

У недалекому минулому БПЛА найчастіше були пов'язані з військовими, де їх спочатку використовували для зенітних цільових практик, збору розвідки, а потім, що суперечливіше, як озброєні платформ. Зараз БПЛА також використовуються в широкому діапазоні цивільних ролей, починаючи від пошуку та порятунку, спостереження, моніторингу дорожнього руху, моніторингу погоди та пожежогасіння, до персональних безпілотників та ділової фотографії на основі безпілотників, а також відеозйомки, сільського господарства та навіть служб доставки [6].

Комунікації наземних та безпілотних апаратів відбуваються в залежності від відстані та інших параметрів через Wi-Fi, радіозв'язок чи супутниковий зв'язок. Поширення інтелектуальних пристроїв та безпроводних додатків із вимогою до збільшення якості передавання призводять до необхідності розширення радіочастотної робочої смуги. Поки вирішенням для розгортання мереж наступних поколінь у містах є ущільнення стільникових вузлів із транзитними волоконно-оптичними з'єднаннями високої пропускної здатності. Однак розгортання мереж у малонаселених районах і на великих відстанях із високою пропускною здатністю залишається проблемою. Сьогодні найбільш продуктивними за пропускною здатністю є волоконно-оптичні системи, для яких граничні експериментальні швидкості становлять сотні терабіт за секунду, але ще не дають змоги в глобальному масштабі реалізувати якість технологій 5G і наступних поколінь. Можливим вирішенням цієї проблеми є багаторівнева система зв'язку, яка об'єднує наземні та неназемні (супутникові, безпілотні тощо) системи телекомунікацій [9].

Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання. Завдяки технічному прогресу у сфері супутникових технологій нині реалізуються проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb - це три з основних розроблюваних проєктів угруповань супутників LEO наступного покоління, які обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу.

БПЛА продовжуватимуть набирати популярність у суспільстві, в сферах від доставки ліків у віддалені райони до відстеження лісових пожеж. Однак важливо мати потужну базу функцій автопілоту для керування цими безпілотниками, оскільки ручне управління може бути неможливим. Існують програмні інструменти з відкритим кодом, які можуть допомагати пришвидшити впровадження безпілотників з автопілотом: – Ardupilot; – Crowdsourcing; – Micro air vehicle; – ArduCopter; – OpenPilot; – Open-source robotics; – Paparazzi; – PX4 autopilot; – Slugs (autopilot system) [22].

ArduPilot – один з найпопулярніших проєктів на основі Arduino з відкритим кодом для управління автономними транспортними засобами. Платформа Ardupilot складається з трьох основних компонентів, що стосуються обладнання, прошивки та програмного забезпечення. Їх основні підпроєкти з підтримки різних транспортних засобів включають квадрокоптери, літаки та ровери. ArduPilot дозволяє створювати та використовувати надійні, автономні, безпілотні системи транспортних засобів для цивільного використання. ArduPilot пропонує широкий набір інструментів, придатних для практично будь-якого автомобіля та додатків. Як проєкт з відкритим кодом, він постійно розвивається на основі швидкого зворотного зв'язку з боку великої спільноти користувачів. Команда розробників співпрацює із спільнотою та комерційними партнерами, щоб додати ArduPilot функціональність, яка вигідна кожному [33]. Незважаючи на те, що ArduPilot не виробляє жодного обладнання, прошивка ArduPilot працює на різноманітному обладнанні для управління безпілотними транспортними засобами усіх типів. У поєднанні з програмним забезпеченням наземного управління безпілотні машини, що працюють на ArduPilot, можуть мати розширену функціональність, включаючи спілкування в реальному часі з операторами. ArduPilot має величезне Інтернет-співтовариство, присвячене допомозі користувачам у питаннях, проблемах та рішеннях.

Paparazzi – це система автопілоту з відкритим кодом, орієнтована на недорогі автономні літаки. Низька вартість та доступність дозволяють використовувати любителів у невеликих дистанційно пілотованих літаках. Проєкт розпочався у 2003 році, і надалі розробляється та застосовується у *École nationale de l'aviation civile (ENAC)*, французькій академії цивільної авіації. В даний час кілька постачальників виробляють автопілоти та аксесуари Paparazzi.

Автопілот дозволяє вилетіти з дистанційного керування літаком поза полем зору. Все апаратне та програмне забезпечення є відкритим та вільно доступним для будь-кого за ліцензійною угодою GNU. Автопілоти з відкритим кодом забезпечують гнучке апаратне та програмне забезпечення. Користувачі

можуть легко модифікувати автопілот на основі власних особливих вимог, таких як оцінка лісових пожеж. Співробітники Paragazzi діляться ідеями та інформацією, використовуючи те саме програмне забезпечення MediaWiki, яке використовується Вікіпедією [29].

Paragazzi приймає команди та дані р датчиків і відповідно регулює управління польотом. Наприклад, командою може бути підйом з певною швидкістю, а папарацці регулюватимуть потужність та керувати поверхнями. Станом на 2010 рік папарацці не мали хорошої функції утримання та зміни швидкості, оскільки контролер не враховує зчитування датчика швидкості повітря. У 2013 році Технологічний університет Delft випустив свій проект чіпів Lisa/S, який базується на Paragazzi. Paragazzi підтримує кілька апаратних конструкцій, включаючи мікроконтролери серії STM32 та LPC2100. Випущено низку файлів САD. Paragazzi передбачає мінімальний набір датчиків польоту:

- оцінка відношення (орієнтація до центру мас) проводиться за допомогою набору інфрачервоних термоелементів;
- положення та висота надходять із стандартного приймача GPS;
- вимірювання швидкості може здійснюватися за допомогою додаткового гіроскопа [32];
- прискорення від додаткових інерційних датчиків;
- напрямок від додаткових магнітних датчиків.

Слабким місцем бортових навігаційних систем БПЛА є система позиціонування сигналами супутникових навігаційних систем. Влаштування радіоперешкод, що заважають прийому сигналів від супутників, спотворюють ці сигнали або транслюють неправдиві навігаційні сигнали, які в кінцевому рахунку приводять до втрати орієнтації БПЛА в просторі і як наслідок, унеможливають виконання покладених на нього завдань.

Методи відеонавігації ґрунтуються на отриманні зображення місцевості камерою з послідуочим його аналізом бортовим комп'ютером і знаходженням координат і орієнтацією в просторі БПЛА. Як правило, сучасні оператори БПЛА використовують звичайну, побутову або студійну фотокамеру на основі

ПЗС матриці. Аерофотознімки високої якості дають дзеркальні фотоапарати (Canon 550D, Canon 5D Mark II). Компанія RockwellCollins розробила систему Vision Augmented Inertial Navigation System (VAINS), в якій забезпечується корекція інерціальної системи за швидкістю і координатами від відеокамери при відсутності сигналів супутникової навігаційної системи [30].

Під час польоту безпілотної в автоматичному режимі розраховує свою швидкість і частоту спрацьовування затвору (швидкість кадрів) так, щоб забезпечити задане перекриття кадрів. Перекриття знімків з БПЛА відповідає звичайним вимогам для аерофотозйомки і становить, як правило, 60% кадру. Знімки з БПЛА перекриваються на 60% в поздовжньому перекритті і на 30% в поперечному перекритті. В результаті польоту формуються набір фотографій і дані телеметрії, які включають в себе координати центру фотографування, а також кути крену, орієнтації і напрямку курсу.

Методи відеонавігації поділяються на розрахунок пройденого шляху на основі аналізу потоку відеоданих, що надходять з оптико-електронних приладів спостереження. У першому кадрі відеопотоку фіксуються певні характерні точки в просторі і далі відбувається відстеження їх переміщення в кадрі при переміщенні БПЛА. За характером переміщення програма визначає, як змінюється положення і орієнтація самої камери. Основним обмеженням даного методу є можливість тільки відносного визначення координат та орієнтації, що може призвести до зростання помилки навігації з часом [31].

Поширеним є метод точної прив'язки по рельєфу по стереоефекту, що виникає при русі камери БПЛА. Даний спосіб дозволяє частково компенсувати недоліки першого методу, адже використовуючи перекриття потоку фото-відеоданих, відновлюється рельєф, він порівнюється із закладеними в пам'ять даними, у випадку «впізнавання місцевості» визначаються точні координати і орієнтація в просторі. Основна перевага перед попереднім методом полягає в можливості знаходження не тільки відносного, але і абсолютного положення камери, оскільки знання карти прив'язує камеру до конкретних точок на місцевості з відомими абсолютними координатами. Це призводить до того, що

помилка навігації не зростає з часом. Основний недолік даного методу - чутливість до занадто великих помилок вихідних координат камери, отриманих від інерційних навігаційних приладів, які метод повинен потім уточнювати. Також зберігається і такий недолік першого методу, як неможливість роботи над водною або піщаною поверхнею і виникнення істотної помилки за відсутності явно вираженого рельєфу.

Метод точної прив'язки за еталонними фотографіями ґрунтується на тому, що кадри відео порівнюються із закладеними в пам'ять зображеннями ділянок маршруту і тільки у випадку «впізнання місцевості» відбувається визначення точних координат і орієнтації в просторі. Цей метод забезпечує високу точність визначення абсолютних координат навіть при відсутності рельєфу. Він також дозволяє знайти абсолютне положення камери, навіть коли її приблизні координати взагалі невідомі. Це досягається шляхом сканування всієї бази даних зі знімками місцевості і порівняння їх з поточним знімком. Крім того, маючи «прив'язаний» знімок можна з високою точністю визначати координати наземних об'єктів, виявлених оптико-електронною апаратурою [34].

Як один з перспективних напрямів підвищення захищеності від перешкод роботи супутникових систем навігації на сьогодні відоме створення радіоприймальних засобів, які побудовані на основі цифрових антенних решіток, які мають підвищену стійкість до навмисностворених перешкод. Зокрема, для цифрових антенних решіток можливе налаштування гострих діаграм спрямованості, які націлені на навігаційні супутники, - при цьому джерела радіоперешкод виявляються за межами зон прийому. Але малогабаритні параметри таких пристроїв створюють проблеми їх розміщення на БПЛА. Також очевидно, що супутники систем навігації відносяться до категорії об'єктів, які у випадку серйозних військових конфліктів підлягають першочерговому знищенню - після цього системи позиціонування БПЛА, орієнтовані на обробку супутникових сигналів, стають баластним вантажем [26].

Крім того, в даний час основним методом позиціонування БПЛА в просторі є глобальна система навігації при якій приймач встановлюється на борт БПЛА і отримує дані з супутників. Для збільшення точності показань даних з глобальної системи Global Positioning System зараз активно стали використовуватися мережі наземних стаціонарних вишок. Такі вишки є реперними для системи навігації БПЛА, вони визначають похибки показань глобальної системи навігації і відправляють поправки по радіоканалу на приймач БПЛА. Однією з поширених, на даний момент, систем такого типу є DGPS (differential global positioning system). Існує ряд досліджень, в яких пропонується використання стаціонарних вишок не тільки в якості коректорів, але і як основне джерело для отримання даних про місцезнаходження [27].

Аналізуючи методи позиціонування БПЛА в просторі слід відмітити, що відомий цілий ряд алгоритмів, які використовують для локалізації цілей по пеленгу. Найбільш поширений алгоритм використовує розширений фільтр Калмана або навіть набір таких фільтрів, що відповідають різним діапазонам дальності. Застосування спеціального рандомізованого тестового сигналу у вхідному каналі дає можливість визначити параметри об'єкту управління, коли розглядається модель об'єкту з майже довільними адитивними перешкодами.

На даний час найбільш поширеними є такі системи і алгоритми уточнення місцезнаходження БПЛА, які базуються на основі калманівської фільтрації вимірювань пеленгаційного типу, позиціонування БПЛА за даними відстаней до одиниць мережі вишок, встановлення комплексу інерційних систем з датчиками, згідно яких автопілот отримує інформацію про повітряну швидкість, крени, прискорення барометричної висоті. У комплекс інерціальної системи входить:

- барометр, який визначає висоту відносно від заданого нульового рівня. Вагомим недоліком такого барометру є велика похибка у вимірах (близько 10-15 м) [18];
- радіотехнічний датчик для вимірюванні відрізка часу між посилкою і прийомом електромагнітних хвиль, відбитих від поверхні, до якої вимірюється



висота (поверхня землі або вода). Вагомим недоліком такого датчика є велике енергоспоживання і невелика відстань дії (до 20-30 м);

- сонар для звукового виявлення підводних об'єктів за допомогою акустичного випромінювання. Його недоліком є мала відстань дії (до 10 м);

- лідар (LIDAR-світлове виявлення і визначення дальності) - датчики для отримання інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем на основі явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. Датчики має велике енергоспоживання і велику вагу, що виключає їх використання в мобільних роботах;

- комплекс з тривісного гіроскопу і акселерометру, який дозволяє визначити кути нахилу БПЛА щодо горизонту і прискорення обертання.

Позиціонування БПЛА за даними вбудованих сенсорів в перші було застосовано для автоматичного орієнтування крилатих ракет в ХХ столітті. Така система вимагає високої точності вимірювання висоти, має велику вагу (більше 20 кг) і велике енергоспоживання, що не дозволяє широко використовувати такий метод для БПЛА [21].

Ключовим вирішенням для підвищення продуктивності бездротових телекомунікаційних мереж може бути застосування хвиль міліметрового діапазону та оптичного діапазону, які дають можливість організувати канали передавання з шириною в кілька гігагерц, а пропускна здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5G вирішенням збільшення пропускної здатності є зменшення розміру стільників і збільшення, відповідно, щільності базових станцій. Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, оскільки природне поглинання обмежує розмір стільників, підвищуючи спектральну ефективність. У вікні поглинання 60 ГГц міститься до 7 ГГц частотного ресурсу для розгортання таких мереж. Іншою перевагою використання високочастотних діапазонів міліметрового та оптичного діапазонів є можливість створення дуже вузьких спрямувань антен [19].

Ідеї створення багаторівневих систем зв'язку між наземним і не наземними сегментами з'явилися завдяки технічному прогресу в області створення повітряних і космічних мініатюрних супутникових платформ, що можуть працювати аналогічно наземним базових станцій. До неназемних платформ відносять наступні системи (рис. 1.1):

- Космічні супутники зв'язку, що за висотою орбіти поділяються на низькоорбітальні LEO, середньовисотні (MEO) та геостаціонарні (GEO).
- Стратосферні платформи (High Altitude Platform – HAP), розташовані на висоті 18-25 км (за особливістю атмосфери на цих висотах майже постійна температура та відсутні вітри). Можуть покривати відстані сотні кілометрів, працювати протягом тривалого часу, але вони також можуть повернутися на землю для реконфігурації. Затримка поширення сигналу 50-85 с значно нижче в порівнянні з GEO (120 мс), MEO (15-85 мс) і навіть LEO (1,5-3 мс). Стратосферні платформи можуть містити функції Mobile Edge Cloud (MEC), щоб пропонувати наземним терміналам додаткові обчислювальні можливості та можливості зберігання, тим самим розширюючи охоплення в сторону 3D.

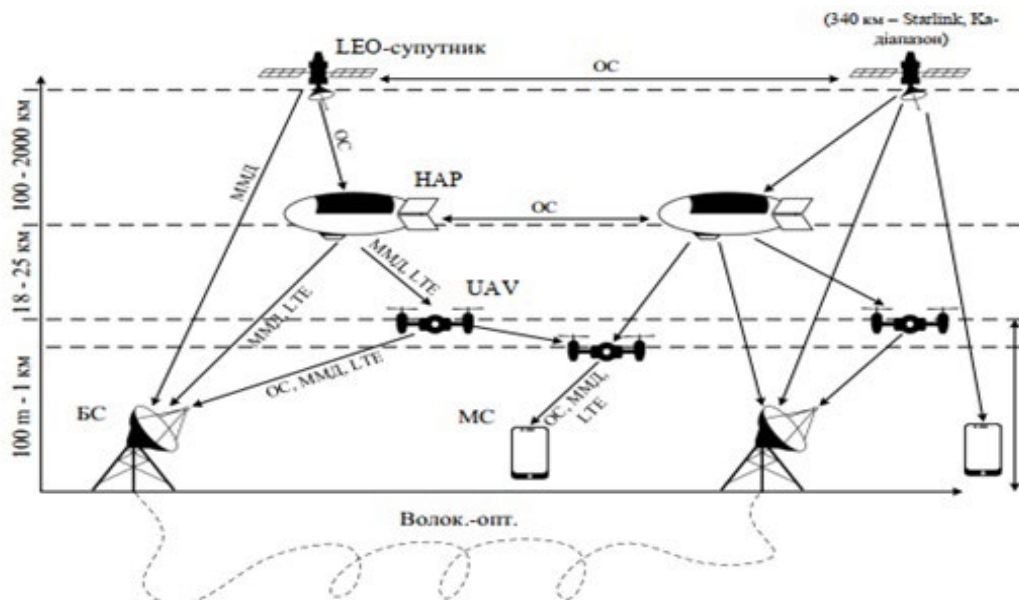


Рис. 1.1. Архітектура багаторівневого космічного зв'язку з використанням низькоорбітальних супутників та безпілотних ретрансляторів

Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [5]

- Низьковисотні платформи (Low Altitude Platform – LAP) або безпілотні літальні апарати (БПЛА, англ. Unmanned Aerial Vehicle – UAV), до яких відносять також як прив'язні повітряні кулі.

Прогнозується, що БПЛА стануть важливим компонентом для розгортання бездротових мереж в найближчому майбутньому. Оптимізації архітектури такої багаторівневої системи також сприяє перехід до програмно-конфігурованих мереж (Software Defined Networking – SDN), яка в поєднанні з секціонуванням мережі полегшує розгортання і управління мережевими функціями віртуалізації (Virtualization Network Functions – VNF) на різних фізичних платформах. Така архітектура мережі з використанням програмного керування може забезпечити адаптацію з розподілу частотних ресурсів, потужності і спрямованості антен, швидке реагування на зміну трафіку і динаміку навантаження.

Для каналів управління сучасних БПЛА малого класу (вертолітного типу, цивільного, користувач кого призначення) найбільш характерним, є застосування захищених режимів так званого - псевдовипадкового перелаштування робочої частоти - «швидкого ППРЧ». В даний час більше 80% цивільних «дронів» випускаються іноземними виробниками, використовують режими ППРЧ в каналах управління (НПУ-БПЛА) [20].

Режими ППРЧ, спочатку розроблювалися для застосування в галузі військової ради і зв'язків, їх застосування в цілях управління цивільними дронами, обумовлений специфікою застосування.

Реалізована іноземними виробниками перешкодостійкість каналу управління, більшості дронів, по ряду критеріїв не вступає аналогічним критеріям сучасних перешкодозахищеним системам, що застосовуються у військовій практиці заради зв'язку.

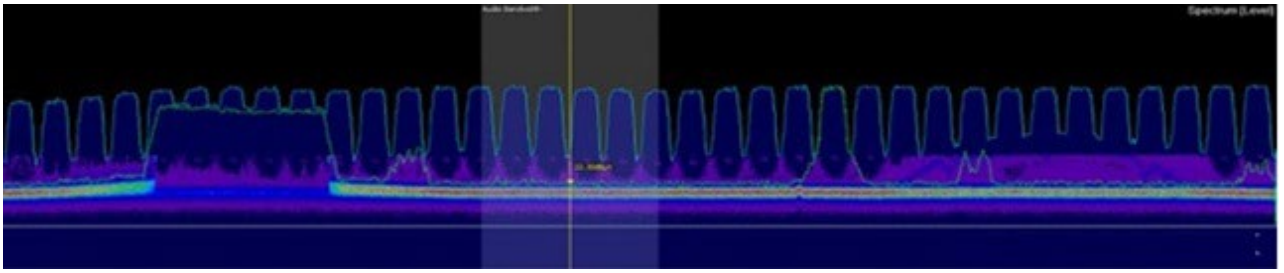


Рис. 1.2. Поліхромна діаграма спектра (отримана в режимі накопичення даних) для каналу керування ППРЧ типового БПЛА

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [30]*

Незважаючи на значну різноманітність типів, моделей і виробників дронів (використовуючих ППРЧ, каналах управління), можна виділити загальні параметри і характеристики, що є типовими для більшості іноземних виробників:

- максимальна «легальна» потужність випромінювання сигналу (в каналі управління) – 100 мВт;
- типові (пріоритетні) діапазони частот – 2.4 і 5.8 ГГц;
- швидкість дії режиму ППРЧ (типово) - від 350-500 ск / сек (макс. 2 900 ск / сек);
- вид модуляції (типово)-FSK2 (рідше -PSK2 (A/B) та OFDM);
- тривалість імпульсу (типово)-500 мкс -2.5 мс;
- ширина імпульсу (типово) -300 кГц -2 МГц;
- символна швидкість передачі (типово) – 1 000 – 2 000 кбод;
- смуга «сітки ППРЧ» – близько 80 МГц;
- кількість каналів «сітки ППРЧ» - до 40.

Для каналу управління даного БПЛА (ППРЧ) характерно: діапазон – 2.4 ГГц; 40-канальна «сітка ППРЧ» у смузі 80 МГц; швидкодія ППРЧ – 350 ск/сек; ширина одиночного імпульсу – близько 1.1 МГц; між імпульсним інтервалом – близько 0.8 МГц.

Зі спектрограми видно, що в одну одиницю часу активний (використовується для передачі даних), тільки один із 40 каналів сітки ППРЧ,

тривалість одного сеансу передачі даних (для цього виробу) становить близько 2-х мс одному каналі.

Зі спектрограми, знятої в умовах реальної РЕО, видно, що в смузі сітки ППРЧ (каналу управління) є сигнали інших РЕМ (зокрема сигналів Wi-Fi, сигналів каналу передачі відеоданих самого БПЛА).

Практичним шляхом встановлено, що для даного виробу характерний високий ступінь стійкості до перешкод. критичні порушення функції управління БПЛА настають лише у разі придушення практично 100% каналів «сітки ППРЧ». У разі не придушення навіть 1-2 каналів, у оператора БПЛА зберігається можливість здійснювати стійке керування літальним апаратом. Специфіка та особливості каналів управління сучасними БПЛА (режим ППРЧ) диктують основні вимоги до систем протидії, реалізує пасивні (радіо-радіотехнічні) методи виявлення сигналів НПУ (каналу керування) [23].

До основних вимог системи протидії, що виконує функції виявлення сигналів каналу управління БПЛА (ППРЧ) можна віднести:

- НВЧ діапазон робочих частот (як мінімум 2.4 і 5.8 ГГц, з урахуванням можливого використання в обладнання БПЛА (інших УКХ-НВЧ діапазонах);
- можливість виявлення сигналів РЕМ особливо малої потужності (тип. 100 мВт) – підвищені вимоги до параметра «чутливість» системи виявлення;
- можливість виявлення сигналів у складних умовах міської РЕО та наявності великої кількості заважаючих сигналів - підвищені вимоги до параметра «виборчість» системи виявлення;
- можливість виявлення короткочасних, імпульсних сигналів «швидкого ППРЧ» - підвищені вимоги до параметра швидкодія системи виявлення;
- можливість виявлення короткочасних, імпульсних сигналів «швидкого ППРЧ», розподілених у широкій (не менше 80 МГц) смузі - підвищені вимоги до параметра «одночасна смуга аналізу» системи виявлення тощо.

Для радіоприймального, радіоконтрольного та радіовимірювального обладнання початкового або середнього класу, виявлення самого факту роботи

РЕМ «швидкого ППРЧ» є дуже складним завданням. Навіть для пошукового РПУ, типу PR100, що має досить високі характеристики, завдання надійного виявлення самого факту роботи РЕМ «швидкого» ППРЧ – носить негарантований, багато в чому випадковий характер [24]. Для РПУ мають менш високі параметри та характеристики, завдання виявлення сигналів «Швидкого» ППРЧ (типових, наприклад, для виробів DJI Phantom) практично нездійсненна.

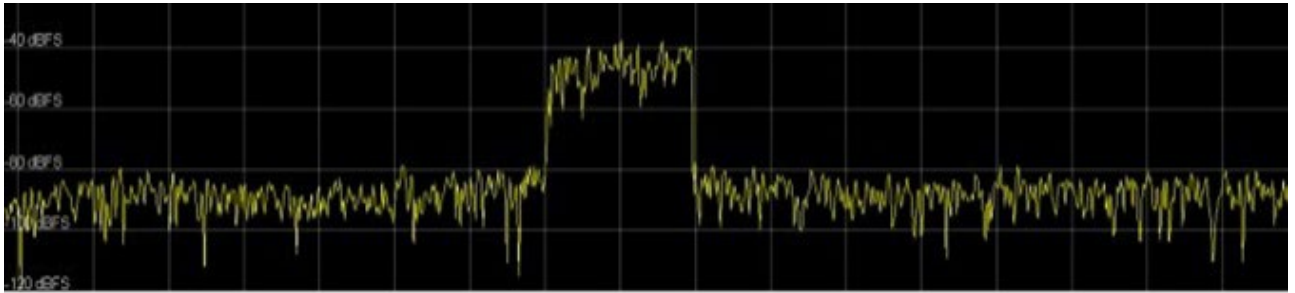


Рис. 1.3. Стандартна спектрограма, як правило, не відображає наявності сигналів каналу керування «швидкого ППРЧ» на екрані приладу

*Примітка: спектрограма отримана в умовах реальної РЕО в діапазоні чинного каналу управління БПЛА (ідентичному представленою на рис. 1.2). Ознаки наявності сигналів каналу управління (ППРЧ) на спектрограмі відсутні. Спостерігається позначка сигналу каналу передачі відео з борту БПЛА.*

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [14]*

Проблема виявлення (пеленгування, ідентифікації) сигналів швидкого ППРЧ (каналу управління БПЛА) є одним із ключових при побудові систем виявлення.

Іноземний комплекс розвідки та РЕБ (розробки компанії THALES, Франція), за повідомленнями ЗМІ, нещодавно поставлений до підрозділів РЕБ Збройних Сил України, ефективний щодо каналів «швидкого ППРЧ», що мають швидкодію не більше 200-300 стрибків за секунду. Для цивільних дронів швидкодія режиму ППРЧ 300-500 ск/сек є типовим початковим рівнем. У 2016-2017 році окремі виробники дронів налагодили випуск виробів із швидкодією 500-1 000 і більше ск/сек (максимальний рекорд для цивільного дрону, станом на 2017 рік – 2 900 ск/сек).

Завдання «виявлення» сигналів каналу управління БПЛА (режим ППРЧ) є лише першим, необхідним кроком, в алгоритмі застосування систем протидії протиправному використанню дронів. Наступні дії системи повинні включати виконання завдання ідентифікації і, за наявності можливості пеленгування сигналів небезпечного об'єкту [13].

Завдання «ідентифікації» є вкрай необхідною в умовах складної РЕО та наявності великої кількості сигналів сторонніх РЕМ (що характерно для міських умов та типових «легальних») діапазонів каналів керування БПЛА).

Без вирішення проблеми якісної ідентифікації, система може майже безперервно реагувати на численні сигнали сторонніх РЕМ (постійні хибні спрацьовування), що значно знизить можливість її практичного застосування у реальних умовах обстановки. Зниження ж порогу спрацьовування (з метою мінімізації хибних тривог) загрожує ризиком пропуску сигналів небезпечного об'єкта (не виявлення факту потенційно небезпечного застосування БПЛА). Основні проблеми, пов'язані з якісним виконанням завдань «ідентифікації» та «пеленгування», також пов'язані з двома ключовими параметрами сигналів каналу управління БПЛА – мала потужність (100 мВт) та режим швидкого ППРЧ (від 300 ск/сек).

Таким чином, в сучасних телекомунікація набувають все більшого поширення комунікаційні ланки з використанням БПЛА, тому існує потреба у більш детальному дослідженні їх можливостей та напрямків вдосконалення телекомунікацій за їх участю.

### **1.3 Обґрунтування потреби в інноваційних рішеннях в умовах активного використання БПЛА**

В епоху стрімкого прогресу в галузі технологій, мережеве співтовариство стикається з постійним викликом зрозуміти, які вимоги кожного сегмента ринку і як визначити, що мережі повинні робити, щоб відповідати запитам нових галузевих вертикалей [17].

Ключовими рішенням для підвищення продуктивності бездротових телекомунікаційних мереж може бути застосування ММД та ОД хвиль, які дозволяють організувати канали передачі з шириною в кілька гігагерц, а пропускна здатність відповідає ширині каналу. Для мобільних систем 5 G рішенням збільшення пропускної спроможності є зменшення розміру стільників і збільшення, відповідно, щільності базових станцій. Діапазон 60 ГГц, де спостерігається сильне поглинання в атмосфері, розглядається як варіант для організації мікростільників, так як природне поглинання обмежує розмір стільників і таким чином підвищує спектральну ефективність. У вікні поглинання 60 ГГц міститься до 7 ГГц частотного ресурсу для розгортання таких мереж.

Іншою перевагою використання високочастотних діапазонів ММД та ОД є можливість створення дуже вузьких спрямувань антен. Так як за фізичними закономірностями формування і поширення електромагнітних хвиль із зменшенням довжини хвилі з'являються можливість зменшення кута розкриття антени. Створення вузько направлених випромінювань (для ММД в кілька градусів і навіть часткою одного градуса) пов'язано з можливістю реалізації технології МІМО (Multiple Input Multiple Output) багатопроменевого поширення сигналу, що також підвищує продуктивність і енергоефективність таких систем.

Закономірності поширення хвиль ММД та ОД в атмосфері, в космосі, інших середовищах, в міських сценаріях ще вивчаються. Принципи моделювання каналів в міліметровому діапазоні відрізняються від моделей в інших більш низькочастотних радіодіапазонах, наприклад, 800 МГц-5 ГГц. Основними особливостями розповсюдження хвиль є слабе посилення за рахунок дифракції, поширення в області прямої видимості, поглинання в атмосфері (рис. 1.4), особливо в вікнах поглинання атмосфери. В області 100 ГГц досліджуються явища перевипромінювання в атмосфері [14].



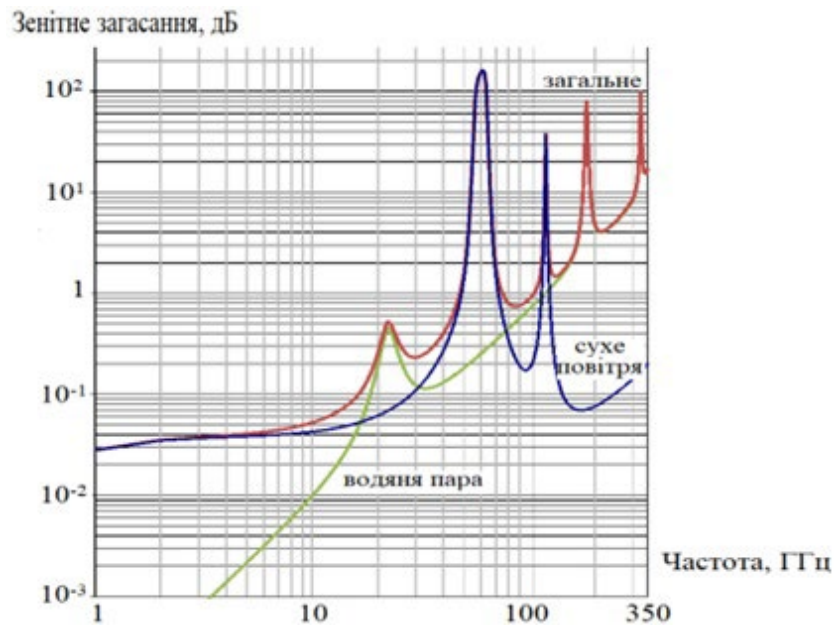


Рис. 1.4. Загальна зенітне загасання, загасання в сухому повітрі і водянній парі (тиск = 1013,25 гПа; температура = 15° С; щільність водяної пари = 7,5 г/м<sup>3</sup>)

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [10]*

Отже, мережі мобільного зв'язку 5G вже розгортаються по всьому світу. 5G підтримує покращений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB) для забезпечення пікової швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с. Крім того, наднадійний зв'язок з малою затримкою (uRLLC) зводить до мінімуму затримки до 1 мс, в той час як масовий зв'язок машинного типу (mMTC) підтримує більш ніж в 100 разів більше пристроїв на одиницю площі у порівнянні з 4G. Очікувана надійність і доступність мережі становить понад 99,999%. Програмне забезпечення мережі – це відома технологія 5G, яка забезпечує динамічність, програмованість і абстракцію мереж. Можливості 5G дозволили використовувати нові додатки, такі як віртуальна реальність (Virtual Reality – VR), доповнена реальність (Augmented Reality – AR), змішана реальність (Mixed Reality – MR), автономні транспортні засоби, Інтернет речей (Internet of Things – IoT) і автоматизована промисловість [16].

Одна з ключових відмінностей між сучасними мережами та майбутніми мережами полягає в тому, що останні будуть базуватися на абсолютно нових

технологіях, як апаратних, так і програмних. Вони повинні бути сумісними з нинішнім та майбутніми поколіннями та новими утвореннями космічних мереж. Очікується, що мережі 6G будуть більш функціональними, інтелектуальними, надійними, масштабованими і енергоефективними, щоб задовольнити всі очікування, які неможливо реалізувати за допомогою 5G. 6G також потрібно для задоволення будь-яких нових вимог, таких як підтримка нових технологій, додатків і нормативних вимог, які виникнуть в найближче десятиліття. 6G відповідно до подання сьогодні: мережі мобільного зв'язку 6G, як очікується, будуть забезпечувати екстремальні пікові швидкості передачі даних більше 1 Тбіт/с [41]. Наскрізні затримки будуть непомітними і становитимуть менше 0,1 мс. Мережі 6G нададуть доступ до потужних периферійних інтелектуальних засобів, у яких затримки обробки даних впадуть нижче 10 нс.

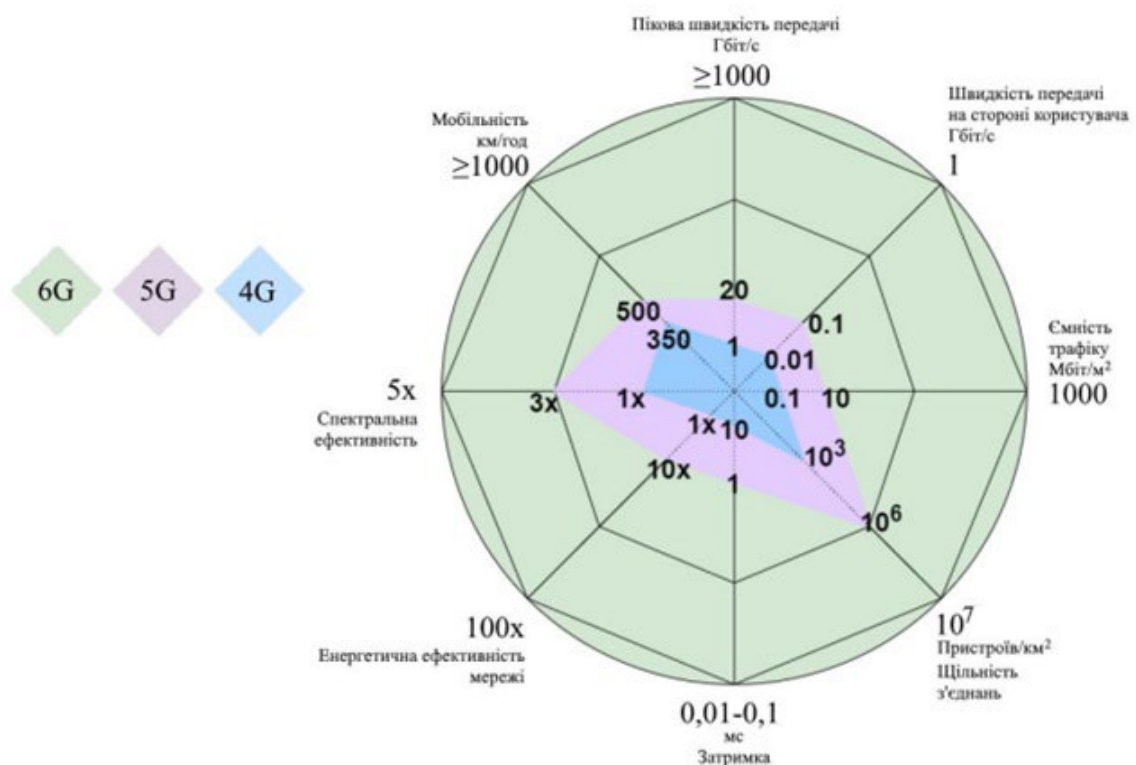


Рис. 1.5. Порівняння основних показників для мереж 4G, 5G та 6G

Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [15]

Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж представлено на рис. 1.6.

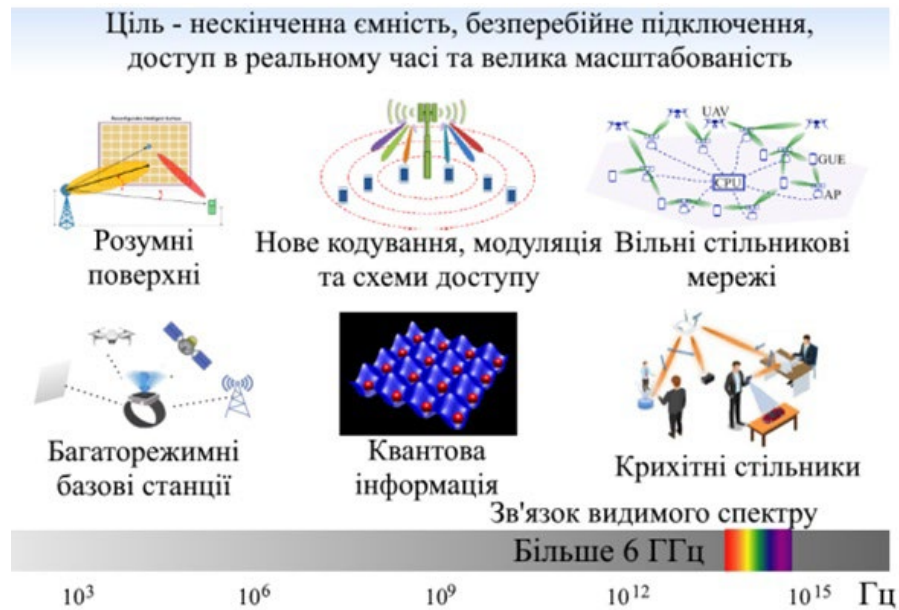


Рис. 1.6. Ключові комунікаційні технології, що пропонуються для майбутніх мереж

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [15]*

Очікується, що в 2030-х роках з'явиться ще кілька нових ініціатив, таких як мобільні технології 5G та/або шостого покоління (6G). Тоді позиціонування Network2030 має бути уточнене щодо досягнень мобільного зв'язку. Network2030 – це технологія, що пов'язана з фіксованою мережею. Вона потребуватиме більш комплексного погляду на майбутню еволюцію мережі, с оглядом на програми та послуги, актуальні в даний період часу та за його межами.

За останні кілька років відродився інтерес до космічних Інтернет-сервісів, особливо до мега-угруповань LEO-супутників, таким як SpaceX Starlink, Amazon Kuiper і OneWeb. Поновлення інтересу до супутникового доступу на LEO сприяло появі декількох факторів. Ключовим фактором є значне зниження вартості запуску з появою підриєвних пускових установок, що повторно використовують частини ракет, як це передбачено, наприклад, в SpaceX. Тим часом, використання готових компонентів (COTS) і прийняття принципів

бережливого виробництва при проєктуванні і виробництві супутників дозволяють масове виробництво з більш швидким виробничим циклом при менших витратах. Також стало комерційно можливим використовувати передові технології супутникового зв'язку, такі як технології багатоточкових променів і складної бортової цифрової обробки [35].

Ще один ключовий фактор – це велика готовність інвестувати в супутниковий доступ на LEO, щоб допомогти з'єднати тих непідключених, мотивованих комерційним потенціалом, економічним розвитком і гуманітарними міркуваннями щодо подолання цифрового розриву. Проєкт партнерства третього покоління (3GPP) працює над адаптацією систем 5G для підтримки супутникового зв'язку. Розвиток 5G для підтримки доступу до LEO-супутників ґрунтується на гнучкості, властивій системам 5G. Першим завданням проєктування є підключення мобільних пристроїв 5G до супутникових мереж доступу на основі 3GPP у діапазоні частот нижче 6 ГГц, щоб можна було забезпечити підключення 5G у областях, де наземні мережі 5G недоступні. Друга мета проєкту – забезпечити широкосмугове з'єднання для більш досконалих пристроїв, таких як термінал з дуже малою апертурою (VSAT) або наземна станція (ESIM), що рухається, особливо на більш високих частотах (наприклад, діапазони Ku/Ka). Крім прямого супутникового доступу, 3GPP також працює над супутниковим транспортним зв'язком 5G, який може полегшити пропозицію стільникових послуг у тих областях, де наземні транспортні засоби неможливо або надто дорого побудувати [40].

Під неназемною мережею розуміється мережа або сегмент мереж, що використовує радіочастотні ресурси на борту супутника (або платформи чи 29 БПЛА). Типовий сценарій неназемної мережі, що забезпечує доступ до обладнання, показаний нижче:

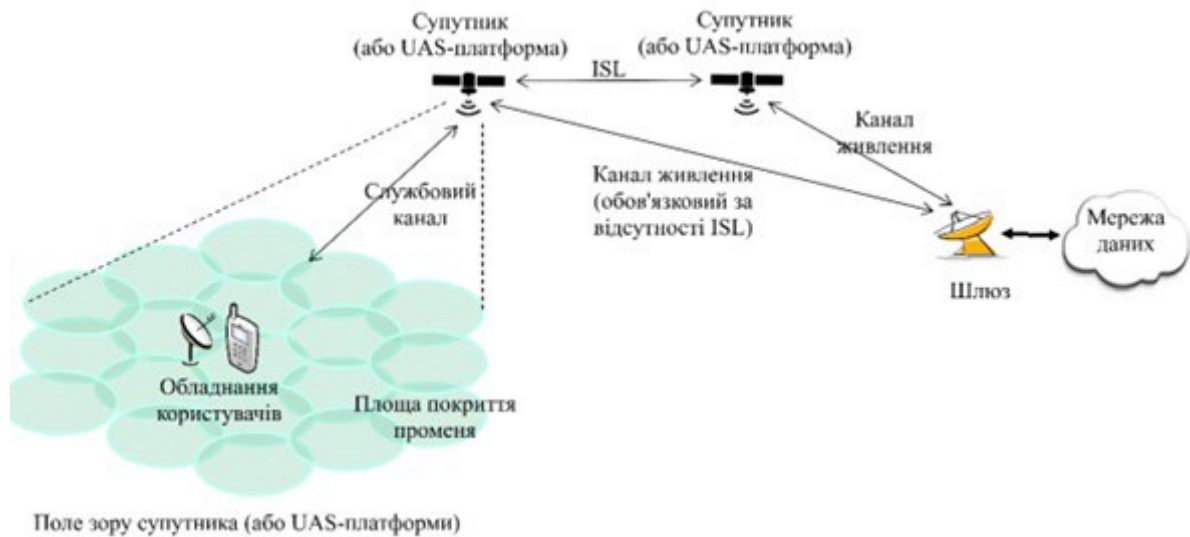


Рис. 1.7. Типовий сценарій розгортання мереж на основі супутника

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [8]*

Неназемна мережа зазвичай складається з таких елементів:

- Один або кілька супутникових шлюзів, які з'єднують неназемну мережу із загальнодоступною мережею передачі даних.
- Супутник GEO отримує живлення від одного або декількох супутникових шлюзів, які розгорнуті в цільовому супутниковому покритті (наприклад, регіональному або навіть континентальному). Ми припускаємо, що UE в стільнику обслуговується лише одним супутниковим шлюзом [36].
- Не-GEO супутник послідовно обслуговується одним супутниковим шлюзом за раз. Система забезпечує безперервність обслуговування та фідерної лінії між послідовними обслуговуючими супутниковими шлюзами з достатньою тривалістю часу для переходу до прив'язки та передачі обслуговування мобільності.
- Фідерна лінія або радіозв'язок між супутниковим шлюзом та супутником (або платформою БПЛА).
- Службовий канал або радіоканал між користувальницьким обладнанням та супутником (або платформою БПЛА).
- Супутник (або платформа БПЛА), який може реалізовувати як прозоре, так і регенеративне (з бортовою обробкою) корисне навантаження.

Супутник (або платформа БПЛА) генерує промені, зазвичай генерує кілька променів у заданій зоні обслуговування, обмеженої його полем огляду. Сліди балок зазвичай мають еліптичну форму. Поле зору супутників (або платформ БПЛА) залежить від схеми бортової антени та мінімального кута місця.

- Прозоре корисне навантаження: фільтрація радіочастот, перетворення та посилення частоти. Отже, сигнал форми сигналу, що повторюється корисним навантаженням, не змінюється;
- Рекуперативне корисне навантаження: радіочастотна фільтрація, перетворення та посилення частоти, а також демодуляція/декодування, перемикання та/або маршрутизація, кодування/модуляція. Це фактично еквівалентно наявності всіх або частини функцій базової станції (наприклад gNB) на борту супутника (або платформи UAS) [39].
- Міжсупутникові канали (ISL) за бажанням у разі угруповання супутників. Це вимагатиме регенеративного корисного навантаження на борту супутників. ISL може працювати у радіочастотному або оптичному діапазонах.
- Космічні супутники зв'язку з цільовою зоною обслуговування.

Перспективним інноваційним обладнанням для керування БПЛА є використання бездротового зв'язку, що поєднує конвергенцію в наземних, супутникових та безпілотних станціях. Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дають змогу застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність. Можливості підвищення продуктивності завдяки багаторівневим висотним системам зв'язку базуються на таких факторах [38]:

- використання в одному тракті міліметрових та оптичних діапазонів, а також діапазонів LTE, волоконно-оптичних ліній залежно від структури атмосфери, погодних умов, територіального розташування;
- у стратосферних платформах і БПЛА можливе підсилення потужності сигналу завдяки використанню панелей перетворення сонячної енергії,

збільшенню напрямленості (підсилення) антени, застосуванню технології «Multiple Input - Multiple Output» (MIMO);

- космічна (бортова) станція може виробляти: фільтрацію і перетворення радіочастот, демодуляцію/декодування, перемикування/маршрутизацію, кодування/модуляцію.

Середня пропускна здатність відкритих наземних оптичних систем 2 Гбіт/с. Однак із вдосконаленням методів оптоелектронного оброблення сигналів швидкість передавання може зрости до сотні (і більше) гігабіт за секунду [36].

Тому існує потреба в дослідженні інноваційних технологій з використанням БПЛА як елементу багаторівневої системи телекомунікацій.

## РОЗДІЛ 2.

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОНВЕРГЕНЦІЇ НАЗЕМНОГО ТА ПОВІТРЯНОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

#### 2.1 Сутність та завдання конвергенції наземного та повітряного бездротового зв'язку

Сучасна тенденція до конвергенції мереж, тобто створення універсальної мультисервісної мережі, здатної надавати послуги як комп'ютерних, так і телекомунікаційних мереж призводить до необхідності перенесення різних видів трафіку, в тому числі, чутливого до затримок. Процес конвергенції, в Рівень N+1 Рівень N-1 Рівень N Система А Інтерфейс Протокол Рівень N+1 Рівень N-1 Рівень N Система В Інтерфейс основі якого лежить прагнення зменшити витрати на підтримку мережевої інфраструктури за рахунок об'єднання різних потоків інформації в загальний цифровий потік, вимагає введення кодів ідентифікації вмісту [37].

На даний час замість традиційних методів комутації каналів, які зазвичай використовуються для телефонних мереж, все частіше застосовуються методи комутації пакетів. І на це, звісно ж, є вагомі причини. Основною з яких є та, що за комутації пакетів ефективніше використовується пропускна здатність в каналах зв'язку. Як відомо, в телефонних розмовах значну частину часу з'єднання становлять паузи, так ось саме пакетна комутація дозволяє ці паузи «вирізати» і звільнену пропускну здатність використовувати для з'єднання інших абонентів.

Ще однією причиною є та, що на даній технології побудована мережа Інтернет, а вона, як відомо, стає все популярнішою. Використання технології комутації пакетів для того, щоб одночасно передавати через пакетні мережі трафік різного виду – відео, голосовий та текстовий – спонукало до розробки методів, які зможуть забезпечити 9 необхідну якість обслуговування (Quality of Service, QoS). Методи QoS застосовують для мінімізації рівня затримок, якщо



трафік до них чутливий (наприклад, голосовий) і також, щоб одночасно гарантувати середню швидкість передачі для пульсуючого трафіку [46].

Перша спроба створення мультисервісної мережі, здатної надавати різні послуги, в тому числі послуги телефонії і передачі даних, привела до появи в 80-х роках технології цифрових мереж з інтегрованим обслуговуванням (Integrated Services Digital Network, ISDN)[1]. Однак на практиці ISDN надає, в основному, телефонні послуги, а на роль глобальної мультисервісної мережі нового покоління претендує Next Generation Network (NGN).

Система обслуговування з максимальними зусиллями (її ще називають *best-effort service*) передбачає такий тип обслуговування, коли взагалі немає ніяких гарантій щодо доставки даних (така система не відноситься до систем з підтримкою QoS). Тобто її суть полягає в тому, що оператор надає всі наявні ресурси(наприклад, пропускну здатність, розмір буферу), але не гарантує ні дотримання певних вимог до швидкості передачі трафіку, ні навіть не гарантує, що дані взагалі будуть передані. Пакети потоків трафіку тут обробляються за принципом FIFO («перший прийшов – першим пішов»), але якщо буферна пам'ять повністю заповниться, то тоді всі «нові» пакети будуть просто відкидатись, адже дана система не підтримує ніякі механізми забезпечення якості (QoS) [42].

В основному виділяють три складові архітектури служби підтримки QoS, які можна побачити на рисунку 2.1:

- засоби служби підтримки якості надання послуг на вузлі мережі, що здійснюють обробку потоку пакетів, які надходять до вузла відповідно до умов сервісної угоди;
- протоколи сигналізації служби підтримки якості (QoS сигналізації), за допомогою яких здійснюється координація роботи мережних елементів в процесі підтримки заданих рівнів послуг при обслуговуванні «із кінця в кінець»;
- засоби реалізації централізованих функцій підтримки прийнятих правил забезпечення якості обслуговування (у тому числі, функцій керування

механізмами служби QoS та обліку її ресурсів), що призначені для цілеспрямованого впливу на мережні елементи з метою раціонального розподілу ресурсів мережі між різними видами трафіку відповідно до умов сервісних угод.

Елементи служби підтримки QoS присутні майже на всіх пристроях мережі, саме тому вона вважається розподіленою. Для керування всіма розподіленими елементами застосовуються протоколи QoS-сигналізації. Для побудови служби QoS використовують схему «менеджер - агент», - в якості менеджера виступає сервер, який підтримує правила політики QoS, а в якості агентів – засоби, які інтегруються у склад мережевого обладнання, що і реалізують ці правила. Для мережевого керування застосовуються протоколи сигналізації QoS, - вони виступають координаторами, які регулюють роботу механізмів служби QoS під час проходження трафіку мережею (наприклад, для IP мереж застосовують протокол RSVP) [43].

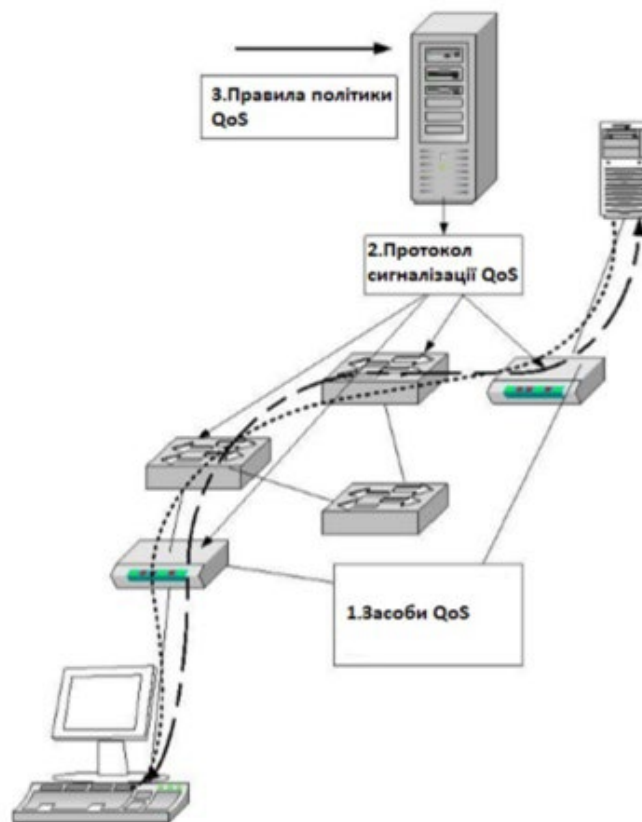


Рис. 2.1. Базова модель служби підтримки якості надання послуг

*Джерело: Результати власної систематизації наукової літератури [8]*

Для побудови служби QoS на сьогодні застосовуються два типи архітектури – на базі інтегрованих служб (Integrated Services Architecture, IntServ) та на базі диференційованих служб (Differentiated Services Framework, Diff-Serv). Архітектура Diff-Serv частіше застосовується на магістральних частинах мереж, так як вона краще масштабується, ніж Int-Serv, яка орієнтована на периферійне обладнання [45].

Модель IntServ передбачає інтегровану взаємодію маршрутизаторів мережі, що забезпечує необхідну якість обслуговування вздовж усього шляху потоку трафіку між кінцевими комп'ютерами. Пропускна здатність мережі і буферна пам'ять розподіляються відповідно до QoS запитів додатків, які розповсюджуються шляхом застосування протоколу сигналізації RSVP, який дозволяє резервувати ресурси для кожного потоку. IntServ підтримує три класи обслуговування: служба з гарантованим обслуговуванням (guaranteed service) забезпечує гарантовану пропускну здатність і фіксовані затримки; служба з максимально доступною якістю (best-effort), - коли якість сервісу залежить від ступеню завантаження мережі (від невеликої до критичної); служба з контрольованим завантаженням (controlled load service) адаптує службу з максимально доступною якістю до невеликих мереж.

## **2.2 Огляд існуючих методів конвергенції наземних та повітряних телекомунікацій**

Конвергенція в системах телекомунікацій – це процес зближення, взаємопроникнення та, подекуди, інтеграції мережних технологій, послуг, обладнання тощо. Основними факторами, що дозволяють істотно покращити умови обслуговування для абонента й доходи оператора, є додаткові (нові) послуги зв'язку, які в рамках існуючих технологічних рішень не могли бути надані з заданими показниками якості зв'язку [43].

Одним з методів конвергенції наземних та повітряних телекомунікацій є модель «концепції мережі керування телекомунікаціями» (Telecommunications Management Network, TMN), яка має такі завдання:

- забезпечувати можливості використовувати різні стратегії керування й ступені розподілення функцій керування;
- реалізовувати керування різнорідними мережами, обладнанням та послугами в телекомунікаційному середовищі;
- забезпечувати функціонування структур ізольованого типу, в яких функції керування можуть здійснюватися автономно;
- швидко адаптовуватися до технологічних і функціональних змін у телекомунікаціях;
- гарантувати безпеку та цілісність інформації у процесі виконання функцій керування [44].

Використання методу конвергенції в наземних та повітряних телекомунікаціях за допомогою концепції TMN, відповідно до Рекомендації M.3010 ITU-T, підтримує такі рівні керування: рівень адміністративного керування (B-OSF); рівень керування обслуговуванням (S-OSF); рівень керування мережею (N-OSF); рівень керування елементами (NE-OSF); рівень мережевих елементів (NEF).

Конвергенція в наземних та повітряних телекомунікаціях за допомогою TMN для збору інформації від агентів адміністратор використовує метод упорядкованого опитування. Агенти зберігають зібрану статистичну інформацію у своїх базах даних MIB (Management Information Base). Структуру MIB, зазвичай, зображують у вигляді ієрархічно організованого дерева MIT (Management Information Tree). На верхніх рівнях MIT розташовано найбільш важливі атрибути, які детальніше характеризуються атрибутами нижніх рівнів MIT [45].

Між TMN і користувачем зовнішнього доступу може відбуватися обмін інформацією керування двох видів: тією, яка стосується специфічного інтерфейсу або специфічної лінії (наприклад шлейфу за запитом користувача)

або тієї, яка стосується подій на різних лініях і послугах, доступних користувачеві. В останньому випадку обмін інформацією керування відбувається централізовано в точці  $x$  на з'єднанні між двома TMN або TMN і мережею користувача. Для цього необхідно забезпечити користувачів спільним доступом до операцій керування послугами зв'язку, разом з такими, як безпека доступу й перетворення протоколів.

Проаналізуємо конвергенцію в наземних та повітряних телекомунікацій за допомогою концепції TINA (Telecommunications Information Networking Architecture).

У концепції TINA комутаційні системи подано як набір простих функцій комутації, керованих об'єктами, які розміщені в терміналах і/або на серверах, сумісних із так званим середовищем розподіленого оброблення (Distributed Processing Environment, DPE). Останнє підтримується кожним мережевим вузлом, тобто розподіляє програмні компоненти по різних частинах мережі відповідно до вимог користувача та реальних мережевих можливостей (характеристики трафіку, завантаження мережі, надійність) [47].

Принципи TINA спрямовано на відокремлення досить стабільних функцій оперативного та експлуатаційного керування від функцій розробки послуг, які вимагають гнучкості, динамічності та стрімкомінливих мережевих технологій. TINA застосовують для будь-яких типів послуг та мереж, але спрямована, в основному, на підтримку широкосмугових послуг, послуг мобільності та інформаційних послуг. TINA є надзвичайно перспективною розробкою, розрахованою на середні та тривалі терміни застосування, але не позбавлена, однак, певних недоліків. Основний недолік полягає в тому, що TINA пропонує зовсім нову архітектуру, зосереджуючи при цьому недостатньо уваги на проблемі її сумісності з наявними системами.

Наступним методом конвергенції може бути модель мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN). На початкових етапах розгортання NGN розмовне з'єднання між користувачами з аналоговими та цифровими телефонними апаратами (ISDN), під'єднаними до NGN, залишатиметься однією

з основних послуг. Але організація розмовного з'єднання в NGN має принципові відмінності від налаштування з'єднання в традиційних телефонних мережах. Ці відмінності пов'язано з тим, що мовлення (в даному випадку медіа-трафік) і сигнальна інформація для керування обслуговуванням виклику в NGN передають різними маршрутами та обробляють різні мережеві пристрої, а не єдиний вузол комутації каналів (АТС), як у традиційній ТфЗК [49].

Медіа-трафік проходить безпосередньо між шлюзами доступу або транспортними шлюзами. Сигналізація ж керування обслуговуванням виклику проходить через інший пристрій – спеціальний програмний комутатор, але завжди не там, де проходить медіа-трафік. Маршрути медіа-трафіку й сигналізації сходяться в прикордонному контролері сеансів – ще одному спеціальному пристрої, який застосовують у NGN.

Отже, з функціями комунікаційного обладнання (мультиплексорів, комутаторів і маршрутизаторів) до складу NGN також входять контролери сигналізації й шлюзове обладнання різного призначення. Особливе місце тут займає програмний комутатор, який дає змогу надавати мовленнєві послуги у процесі взаємодії мереж з синхронним режимом перенесення (класична телефонія) та з асинхронним (середовища з пакетною комутацією).

Конвергенція в наземних та повітряних телекомунікацій за допомогою багатопротокольної комутації міток (Multiprotocol Label Switching, MPLS) - це технологія магістральних мереж, яка значно підвищує швидкість передавання трафіку територіальних мереж [50]. Термін «багатопротокольна» в назві технології означає, що технологія MPLS застосовується до будь-якого протоколу мережного рівня, тобто, це своєрідний інкапсулювальний протокол, здатний транспортувати інформацію безлічі інших протоколів вищих рівнів моделі OSI.

Технологія MPLS є незалежною від протоколів каналного й мережного рівнів у мережах IP, ATM і FR, а також взаємодіє з наявними протоколами маршрутизації, такими як протокол резервування ресурсів RSVP або мережний протокол переважного вибору найкоротших маршрутів OSPF.

У MPLS для пересилання пакетів використовуються комутовані по мітках тракти LSP, які були організовані за допомогою протоколів маршрутизації і сигналізації рівня 3. FEC - Forwarding Equivalence Class - клас еквівалентності пересилання - безліч пакетів, що пересилаються однаково, наприклад, з метою забезпечити заданий рівень QoS [51].

Label - мітка - короткий ідентифікатор фіксованої довжини, що визначає приналежність пакета того чи іншого FEC.

Label swapping - заміна міток - заміна мітки прийнятого вузлом мережі MPLS пакета новою міткою, пов'язаною з тим же FEC, при пересиланні пакета до нижчому вузлу.

LER - (MPLS edge router - граничний вузол мережі MPLS) - прикордонний вузол мережі MPLS, який з'єднує домен MPLS з вузлом, що знаходиться поза цим доменом.

Loop detection - виявлення закільцьованих маршрутів - метод, що дозволяє виявити, що пакет пройшов через вузол більше одного разу. Loop prevention - попередження створення закільцьованих маршрутів - метод виявлення і усунення закільцьованих маршрутів.

LSP - (Label Switched Path) комутований по мітках тракт - приходящий через один або більше LSR тракт, по якому йдуть пакети одного і того ж FEC.

ER - LSP - (explicitly routed LSP) - LSP з явно заданим маршрутом - тракт LSP, який організований у спосіб, відмінний від традиційної маршрутизації пакетів.

IPLSR - (Label Switching Router) - маршрутизатор комутації по мітках - маршрутизатор, здатний пересилати пакети за технологією MPLS. MPLS domain - домен MPLS - сукупність вузлів MPLS, між якими існують безперервні LSP.

MPLS egress node - вихідний вузол мережі MPLS - останній MPLS - вузол в LSP, що направляє вихідний пакет до адресату, який знаходиться поза MPLS-мережею.

MPLS ingress node - вхідний вузол мережі MPLS - перший MPLS-вузол в LSP, що приймає вихідний пакет і поміщає в нього мітку MPLS [53].

Площина пересилання даних MPLS не утворює повноцінного рівня, вона «вклинюється» в мережі IP, ATM або FR між 2-м і 3-м рівнями моделі OSI, залишаючись незалежною від цих рівнів. Можна сказати, що можливість функціонування MPLS на мережному й каналному рівнях призводить до утворення так званого рівня 2.5, де, власне, й виконується комутація за мітками.

Для аналізу показників оперативності інформаційного обміну мережі проведений розрахунок швидкості передачі корисного навантаження при здійсненні керування БПЛА оператором. Відмінність корисної пропускної здатності від повної пропускної здатності залежить від довжини кадру. Технологія GE (Gigabit Ethernet) є розвитком технології Ethernet, тому формат кадру практично не відрізняється. Різниця лише в тимчасових параметрах. Міжкадровий інтервал складе 0,096 мкс. Для його обліку в розрахунку цей час переводиться на надлишкову інформацію. Так як швидкість фізичного середовища становить 1 Гбіт/с (тобто  $V_t = 1\,073\,741\,824$  біт/с), то міжкадровий інтервал (IPG) буде дорівнює [52]:

$$IPG = 1073\,741\,824 \cdot 0,096 \cdot 10^{-6} = 13, \text{байт}$$

При розрахунку кількості корисних даних (MSS) слід враховувати, що в технології GE максимальний розмір пакету 1526 байт, з яких 18 байт займає службова інформація (заголовки GE), і 8 байт – преамбула.

Тобто частка користувальницької інформації на інформацію пакета, сформованого за технологією GE становить:

$$\gamma_{GE} = \frac{1526 - 18 - 8}{1526 + IPG} = \frac{1500}{1539} = 0,975$$

Також необхідно залишити місце для міток MPLS ( $N_{\text{мітк.}}$ ) і заголовків TCP / IP ( $N_{\text{зар.}}$ ). У мережах MPLS при використанні VPN потрібно застосовувати стек з 2 міток по 32 біта ( $N_{\text{мітк}} = 8$  байт), де верхня визначатиме маршрут



прямування, а нижня буде використана вихідним граничним маршрутизатором для вибору необхідного сайту VPN [19]. Заголовки TCP / IP займають кожен 20 байт ( $N_{\text{заг.}} = 40$  байт).

З огляду на вищеописаний складу пакета, отримаємо кількість корисних даних в мережі з технологіями MPLS і GE:

$$MSS = 1526 - 18 - 8 - 2 \cdot 4 - 2 \cdot 20 = 1452, \text{ байта}$$

Розрахуємо максимальний розмір пакета в каналі (MTU) з урахуванням міжкадрового інтервалу:

$$MTU = 1526 + IPG = 1539, \text{ байт}$$

При розрахунках не враховується час, необхідний для отримання підтверджень про доставку пакетів, не враховується час на встановлення і може призвести до втрати з'єднання, не враховується затримка мережі GE (так як вони не значні, 0,01–0,4 мс), а також службовий трафік (протоколи управління, маршрутизації і т.д.) [51].

Одним з найбільш відомих алгоритмів, який застосовується для вирішення задачі з пошуку найкоротших шляхів для наземних та повітряних телекомунікацій між оператором та БПЛА є алгоритм Флойда. Цей алгоритм використовує підхід динамічного програмування і виконується по  $O(V^3)$ . Основна ідея полягає в тому, щоб знайти шлях між двома поточними вершинами, через які може пройти потенційний найкоротший шлях.

В основі алгоритму пошуку найкоротших шляхів використовується структура найкоротших шляхів. Нехай дано граф  $G = (V, E)$ , де  $V$  – безліч вершин графа, а  $E$  – безліч ребер. Розглянемо шлях  $p = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{k-1})$ . Нехай даний шлях оптимальний. Тоді оптимальними будуть так само шляхи  $p_{1,i} = (v_1, \dots, v_i)$ ,  $p_{i,j} = (v_i, \dots, v_j)$ , та  $p_{j,k-1} = (v_j, \dots, v_{k-1})$ . Цей факт легко обґрунтувати на підставі того, що вартість шляху складається з суми ваг його частин [55].

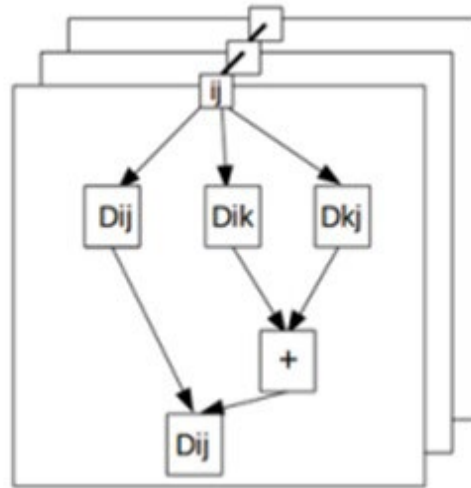


Рис. 2.2. Схематичне зображення алгоритму Флойда-Уоршелла

*Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [33]*

Алгоритм перевіряє транзитивне замикання між вершинами  $i$  та  $j$  через вершину  $k$ . Змінна  $k$  – це лічильник зовнішнього циклу, який містить у собі цикл з лічильником  $i$ , який у свою чергу містить цикл  $j$ . Реалізація алгоритму дуже проста – 3 цикли і одна умова з командою. Проте очевидно, що для алгоритму може давати неочікуваний результат для тих випадків, коли важливий порядок обробки вершин.

Нехай до шляху  $p$  необхідно додати вершину  $v_k$ . Тоді існує два варіанти:

Вартість шляху  $p_{i,j}$  менше вартості шляху  $p'_{i,j} = (v_i, v_k, v_j)$ , тоді в цьому випадку оптимальний шлях не зміниться.

Вартість шляху  $p_u$  більше вартості шляху  $p'_{i,j} = (v_i, v_k, v_j)$ , тоді оптимальним шляхом буде  $p = (v_0, v_1, \dots, v_i, v_k, v_{i+1}, \dots, v_{k-1})$ . Даний факт знову ж впливає з тієї умови, що вага шляху складається з вартості шляху  $p'_{i,j}$  і решти частин [54].

Використовуючи дані твердження, алгоритм можна побудувати наступним чином. Нехай  $d^k_{i,j}$  – вартість оптимального шляху з вершини  $i$  в вершину  $j$ , з перевіреною можливістю проходження через вершину  $k$ . При  $k=0$  значення  $d^0_{i,j} = w_{i,j}$  співпадають з вагою переходу з вершини  $i$  в вершину  $j$ .

Якщо ребро  $e_{j, i}$  відсутня, то  $d_{i, j}^0 = \infty$ . Далі рекурентне співвідношення можна визначити наступним чином:

$$d_{i,j}^k = \begin{cases} w_{i,j} & , \text{якщо } k = 0 \\ \min(d_{i,j}^{k-1}, d_{i,k}^{k-1} + d_{k,j}^{k-1}) & , \text{якщо } k > 0 \end{cases}$$

Використовуючи дане рекурентне співвідношення, можна знайти матрицю  $D_{i, j}^n = (d_{i, j}^n)$ , що містить ваги найкоротших шляхів для всіх пар вершин  $(i, j) \in V$ . Для пошуку найкоротших шляхів часто обчислюють матрицю передування  $\Pi$ . для цього існують прості рекурентні співвідношення [56]:

$$\pi_{i,j}^0 = \begin{cases} NULL & , \text{якщо } w_{i,j} = \infty \\ i & , i = j \\ i & , \text{якщо } w_{i,j} < \infty \end{cases} \quad \pi_{i,j}^k = \begin{cases} \pi_{i,j}^{k-1} & , \text{якщо } d_{i,j}^{k-1} \leq d_{i,k}^{k-1} + d_{k,j}^{k-1} \\ \pi_{k,j}^{k-1} & , \text{якщо } d_{i,j}^{k-1} > d_{i,k}^{k-1} + d_{k,j}^{k-1} \end{cases}$$

Наведемо псевдокод для алгоритму Флойда. Нехай граф заданий матрицею суміжності  $A [n] [n]$ . Хв функція, що повертає мінімум з 2 чисел, повинна враховувати спосіб вказівки в матриці суміжності неіснуючих дуг графа. У даній реалізації довжина несучих дуг покладається рівною нескінченності.

```
void Floyd (A)
for (k = 0; k < n; k++)
for (i = 0; i < n; i++)
if (A [i] [k] ≠ ∞)
for (j = 0; j < n; j++)
if (A [k] [j] ≠ ∞)
A [i] [j] = min (A[i] [j], A [i] [k] + A [k] [j]);
```

Алгоритм Флойда-Уоршелла – динамічний алгоритм для знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами зваженого орієнтованого графа. Розроблено в 1962 році Робертом Флойдом і Стівеном Уоршеллом. Хоча цей алгоритм має назву Флойда-Уоршелла, і його поява в інформаційному просторі датується початком 1960-х років, він по суті включає в собі нароби раніше опублікованих праць Б. Роя (1959 р.) та тісно пов'язаний з алгоритмом

Кліні (опубліковано в 1956) для перетворення детермінованого кінцевого автомата в регулярний вираз.

Цей алгоритм є динамічним і рекурентним, використовується для пошуку відстаней між всіма вершинами мережі.

Алгоритм Флойда – Уоршелла порівнює всі можливі шляхи через граф між кожною парою вершин. Асимптотична складність такої процедури становить  $\Theta(|V|^3)$ . Якщо використати структуру даних «фібоначієві кучі» то складність можна оптимізувати до  $O(V \cdot E \cdot \log(V))$ , де  $V$  – кількість вершин, а  $E$  – кількість ребер (« $O$ » – велике) [13]. Навіщо в цьому алгоритмі використовується парадигма динамічного програмування? Динамічне програмування – це альтернатива вирішення завдань методом «в лоб», тобто brute forc'ом або жадібними алгоритмами. В загальній інтерпретації цю парадигму можна подати наступне [57]:

1. Розбиття задачі на підзадачі меншого розміру.
2. Знаходження оптимального рішення підзадач рекурсивно.
3. Використання отриманого рішення підзадач для конструювання рішення вихідної задачі.

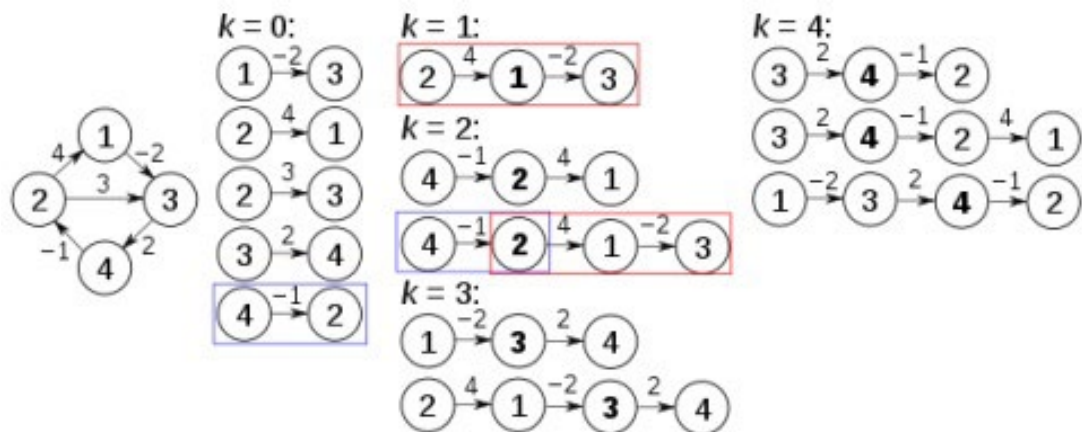


Рис. 2.3. Покрокове виконання алгоритму Флойда-Уоршелла з використанням парадигми динамічного програмування

*Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [40]*

Для знаходження найкоротших шляхів між усіма вершинами графа використовується не перебір всіх можливостей, що призведе до великого часу роботи і зажадає більше пам'яті, а висхідне динамічне програмування, тобто всі підзадачі, які згодом знадобляться для вирішення вихідної задачі, прораховуються заздалегідь і потім використовуються.

### **2.3 Вимоги до архітектури телекомунікаційних рішень в залежності від методу конвергенції**

Метою конвергенції в телекомунікаціях є перетворення моделі бізнесу постачальника послуг від моделі надання з'єднань до моделі забезпечення послуг, що дозволить, в кінцевому підсумку, збільшити доходи всіх учасників ринку при оптимізації витрат. Повноцінну конвергенцію стимулюють багато телекомунікаційні технології, такі як передача голосу через мережу IP (VoIP), передача телебачення через мережу IP (IPTV), набір широкосмугових технологій доступу, включаючи xDSL, пасивні оптичні мережі (PON), Ethernet, Wi-Fi, технології мобільних мереж третього і четвертого поколінь (UMTS / WCDMA, CDMA2000, WiMAX). В кінцевому підсумку використання цих технологій веде до конвергенції фіксованих і мобільних мереж послуг, що отримали назву Fixed-Mobile Convergence, FMC. Конвергенція фіксованих та мобільних мереж та послуг створює середовище, в якому голос, дані та відео гармонізуються та ефективно доставляються через архітектуру, що базується на стеку протоколів IP.

Наведемо два приклади, в яких знайшла відображення технологічна конвергенція в інфокомунікаціях. У сучасному мобільному телефоні є цифрова камера, плеєр mp3, відеокамера, пристрій запису і відтворення голосу та інші пристрої. Для споживача це означає більше властивостей в меншому обсязі, тоді як для різних компаній, діючих в інфокомунікаційній сфері, це означає можливість залишатися конкурентоспроможними в боротьбі за ринок [64].

У конвергенції технологій провідною є концепція конвергенції фіксованого та мобільного зв'язку, що, з одного боку, підвищує доходи операторів, з іншого – задовольняє щоразу вищі вимоги замовників, які орієнтовані на мобільні та IP-технології. Під час передавання трафіка мереж 2.50 й 3.0 через IP-мережі конвергенція технологій забезпечує глибину проникнення аж до мережі доступу оператора мобільного зв'язку.

Архітектура телекомунікаційної мережі – це багаторівневий опис системи, отриманий шляхом структуризації. Уявлення про будову та функціонування мережі зв'язку, як складної системи, також може бути сформовано в результаті формування та дослідження її архітектури. При цьому доцільним є розгляд таких відокремлених структур [55]:

- топологічної, яка визначає розташування пунктів мережі та ліній зв'язку;
- організаційної, яка визначає тип, призначення, статус елементів мережі залежно від виконуваних ними функцій;
- логічної, яка описує роботу мережі на рівні взаємодії мережевих функцій та правил встановлення зв'язку між кінцевими системами, взаємодіючими через телекомунікаційну мережу;
- фізичної, яка відображає фізичні пристрої та програмні засоби, в котрих реалізовано функціональні елементи мережі, фізичні середовища передавання сигналів.

Сьогодні у відповідності з рекомендаціями ІТУ-Т, рекомендовано використовувати чотирирівневу архітектуру мереж наступного покоління NGN: рівень послуг; рівень управління, агрегації, сигналізації; транспортний рівень; рівень доступу.

Для передавання службових сигналів у системі керування необхідним є спеціальні службові канали, які з'єднують пункти системи керування та керовані елементи мережі. Для вирішення цього завдання було розроблено модель спеціалізованої мережі, яка відображає відповідні функціональні блоки й схему їх взаємодії, канали керування та типи інтерфейсів зв'язку, необхідні для реалізації функцій керування на різних ділянках мережі. Така модель

отримала назву «концепція мережі керування телекомунікаціями» (Telecommunications Management Network, TMN) [63].

Фізична архітектура TMN показано на рисунку 2.4 а. Вона містить компоненти, які є фізичною реалізацією функціональних блоків і мережі передавання даних, а також інтерфейси, призначені для взаємодії між ними [5; 62]. Медіатори, які виконують проміжну обробку та зберігання даних і перетворення протоколів, не є необхідними компонентами, тому що їхні функції можуть реалізовувати безпосередньо в мережевих елементах Q-адаптери. Кожна з опорних точок фізично реалізується у вигляді відповідного інтерфейсу.

Визначення функціональних блоків і опорних точок між ними вимагає специфікації інтерфейсів, які застосовують в TMN. Інтерфейси, рекомендовані для TMN. Q-інтерфейс існує між двома TMN - блоками, які знаходяться в одному TMN-домені. Qx переносить інформацію, якою обмінюються MD і DCN.

F-інтерфейс – це інтерфейс між WS і OS та між WS і MD. X-інтерфейс – це інтерфейс між двома OSs, що знаходяться в розділених доменах TMN або OS та іншої OS, яка знаходиться поза TMN. Через Qx-інтерфейс взаємодіють блоки NE та MD; QA та MD; MD та MD. Будь-який функціональний блок, який взаємодіє з OS, використовує Q3 інтерфейс. Інтерфейси TMN міжопераційні, тобто є формально певним набором протоколів, процедур, форматів повідомлень і семантики, які використовують для передавання інформації керування.

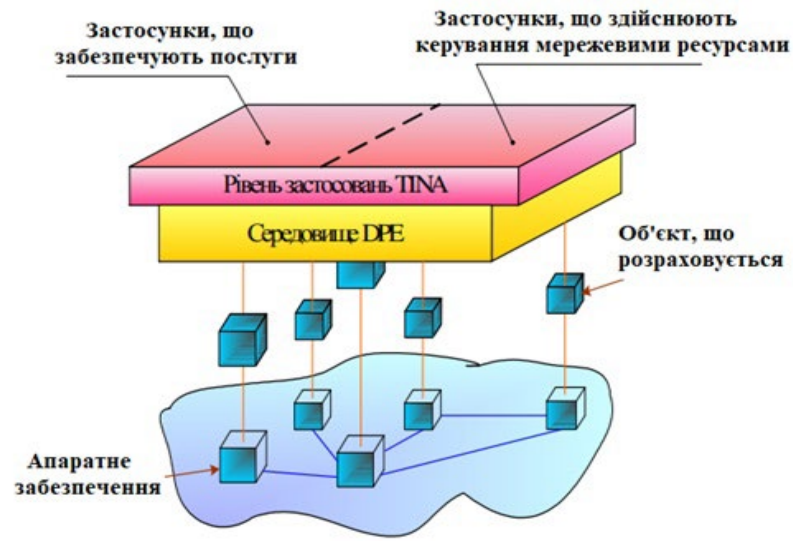
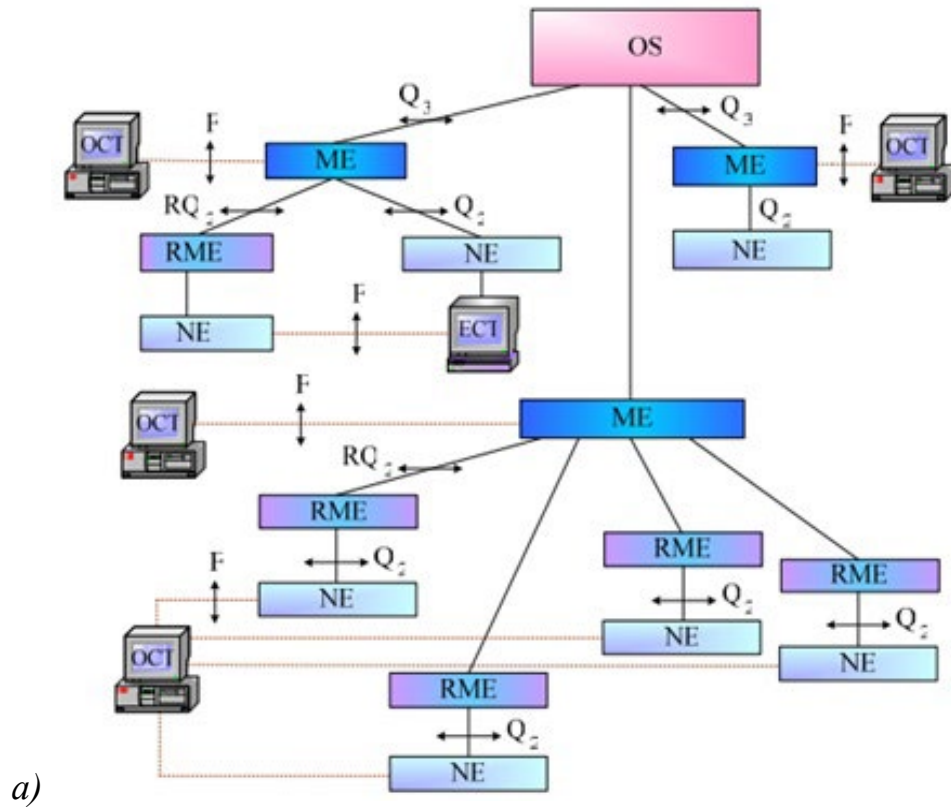


Рис. 2.4. Спрощена фізична архітектура TMN а) та архітектури TINA б)

Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [19]

Функціональні блоки TMN можуть бути розташовані як у межах мережі керування, так і поза нею, серед яких основними є блоки:



- операційної системи (Operations System – OS), яка обробляє інформацію керування телекомунікаціями для контролю, координації та керування функціями зв'язку, а також функції самої TMN. Ці ФБ формують ядро TMN;
- елементів мережі (Network Element – NE), пов'язаних з TMN як об'єкти контролю і керування, хоча вони не є частиною TMN;
- робочої станції (Work Station – WS), що забезпечує засоби для подання інформації TMN. WS організовує інтерфейс між системою керування та персоналом;
- проміжного пристрою сполучення або медіатора (Mediation – M), що обробляє інформацію, яка проходить між OS і NE;
- Q-адаптера (Q-Adapter – QA) для під'єднання зовнішніх відносно TMN опорних точок з інтерфейсами Qx і Q3 до опорних точок TMN та здійснює взаємодію з мережевими елементами або операційними системами, які мають непередбачені в TMN інтерфейси [58].

Концепція TINA (Telecommunications Information Networking Architecture) є інтегрованою архітектурою мережевого інформаційного забезпечення телекомунікацій, яку застосовують до будь-яких типів послуг та мереж, але спрямованою вона є, в основному, на підтримку надання широкосмугових послуг, послуг мобільності та інформаційних послуг. Від TMN було взято принцип поділу на рівні експлуатаційного (адміністративного) керування. Архітектурою TINA визначена група так званих, «породжувальних» обчислювальних об'єктів, які можуть використовуватися для створення нових послуг за допомогою налаштування параметрів і об'єднання. Таким чином, послуги створюються на основі набору компонентів, який постійно розвивається. Середовище DPE підтримує довільний розподіл і взаємодію обчислювальних об'єктів, тож спеціалізовані мережеві вузли не потрібно [52].

NGN (мережа наступного покоління – Next Generation Network) – це мультисервісна мережа, яка забезпечує пакетне передавання всіх видів трафіку з різними вимогами до якості обслуговування й надає користувачам можливість

вільного доступу до мереж і до послуг постачальників конкурентів та / або до послуг з їх вибором. Визначення NGN можна доповнити такими характеристиками:

- універсальна мобільність (generalized mobility) передбачає, що для користувачів і будь-яких рухомих об'єктів надання послуг є безперервним та повсюдним, тобто взаємодія та доступ до послуг не залежатимуть від змін місцезнаходження або технічних умов. Рівень доступу до послуг обумовлюється лише технологічними можливостями мережі доступу, узгодженням рівнів обслуговування між мережею реєстрації користувача та візитною мережею [59];
- можливість широкосмугового передавання з наскрізним QoS передбачає досягнення угод з різними кінцевими системами щодо забезпечення необхідної якості обслуговування з кінця в кінець, щодо використання наборів параметрів протоколу верхнього рівня для керування нижнім рівнем, а також досягнення угод про механізми QoS рівня доступу та транспорту;
- забезпечення безлічі технологій для мереж доступу;
- повна захищеність інформації в мережі;
- незалежність функцій, пов'язаних з послугами, від внутрішніх транспортних технологій;
- забезпечення відкритих інтерфейсів для взаємодії з традиційними мережами;
- різноманітні схеми ідентифікації користувачів та уніфіковані (за оцінкою користувача) характеристики одних і тих самих послуг у різних мережах [60].

Отже, основним принципом концепції NGN є відокремлення функцій транспортування, функцій керування викликами та функцій керування послугами. Багаторівневу архітектуру концепції NGN подано на рисунку 2.5.



Рис. 2.5. Багаторівнева архітектура концепції NGN а) та архітектурна площина рівнів концепції MPLS

*Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [7]*

Основними завданнями транспортного рівня концепції NGN є прозоре передавання інформаційних потоків, а також підтримка взаємодії з наявними мережами зв'язку. На рівні керування викликами обробляють інформацію сигналізації та керування комутацією й передаванням. Рівень керування послугами забезпечує керування логікою послуг та застосувань. Такий функціональний розподіл дає змогу уніфікувати завдання, пов'язані з керуванням викликами, відокремивши їх від особливостей застосовуваних транспортних технологій, та використовувати однакову логіку формування послуги незалежно від типу транспортної мережі та мережі доступу

В останній час технологія MPLS завойовує все більшу популярність і на рівні мереж доступу. Тому, на сьогодні технологія MPLS вважається найбільш перспективною в найближчій перспективі. Одним з основних завдань при створенні архітектури телекомунікаційних рішень будь-якої мережі є

мінімізація необхідного об'єму каналоутворюючого і лінійного устаткування. Це може бути досягнуто за рахунок широкого використання обхідних шляхів в кожному напрямі зв'язку в сукупності з динамічним управлінням процесами розподілу інформації.

Незважаючи на перспективність таких рішень, на сьогодні ще не розроблені комплексні математичні моделі і не створені ефективні засоби аналізу і проєктування такого типу мереж. Це пов'язано в першу чергу із складністю рішення подібного класу завдань і неможливістю чіткого математичного опису процесу функціонування транспортних мереж з число вузлів і кількістю каналів більше чотирьох.

На даний час в науково-технічній літературі не описані методи, які дозволяють при розрахунках основних показників функціонування мереж врахувати особливості використовуваної технології, зокрема технології MPLS. В рамках технології MPLS на поточний момент існує три можливих варіанти організації віртуальних мереж: це BGP-MPLS VPN, VR VPN і VPLS. Крім того, технологія MPLS є незалежною від протоколів каналного й мережевого рівнів у мережах IP, ATM і FR, а також взаємодіє з наявними протоколами маршрутизації, такими як протокол резервування ресурсів RSVP або мережевий протокол переважного вибору найкоротших маршрутів OSPF. Головна особливість MPLS – це відділення процесу комутації пакету від аналізу IP-адреси [60].

Розглянемо один з можливих шляхів вирішення задачі визначення показників якості функціонування і пропускної здатності тунельованої мережі MPLS. Вихідними даними для рішення задачі є:

- Структура мережі, задана матрицею connectivity  $A = \{a_{ij}\}$ ;
- Величина навантаження  $Z = \{Z_{ij}\}$ , що надходить в кожен напрямок зв'язку для обслуговування в ГНН;
- Продуктивність гілок тунельованої мережі  $v_{ij}$ , виражена в ширину смуги пропускання або швидкості передачі, задана матрицею потужностей гілок  $F = \{f_{ij}\}$ .

- Вимоги до смуги пропускання віртуального каналу для обслуговування одного абонента  $\Delta f_{\text{оцк}}$ .
- Алгоритм вибору шляхів встановлення з'єднань в напрямках зв'язку.
- Максимально допустимі ймовірність втрат в напрямках зв'язку, які задані матрицею  $P_{\text{доп}} = \{P_{\text{доп}ij}\}$ .

В результаті вирішення задачі повинні бути визначені:

- Якість обслуговування заявок  $q_{ij} = 1 - P_{ij}$  в кожному напрямку зв'язку.
- Пропускна здатність кожного напрямку зв'язку  $Y_{ij}(p) = Z_{ij} (1 - P_{ij})$

У процесі вирішення завдання централізованого управління мережами зв'язку використовується ряд припущень:

- потік даних, що надходять на обслуговування в кожен тунель LSP, є найпростішим;
- система перебуває в стані статистичного рівноваги;
- система приймається з явними втратами;
- втрати, що виникають в LSP (комутований за мітками тракт – Label Switch Path) маршрутизаторах через зайнятість малі порівняно з втратами із-за зайнятості каналів в гілках мережі і не враховуються;
- ймовірність зайнятості каналів всіх гілок мережі взаємно незалежними.

Рішення поставленої вище завдання передбачає виконання ряду етапів:

- Визначення числа віртуальних каналів в гілках мережі MPLS.
- Визначення сукупності шляхів передачі інформації в напрямках зв'язку.
- Розподіл навантаження по коліях першого вибору і визначення орієнтовних значень якості обслуговування на гілках мережі.
- Корекція значень ймовірності втрат і навантаження на гілках мережі.
- Визначення якості обслуговування і сповненою навантаження в напрямках зв'язку і порівняння з заданими вимог [11].

Спрощений алгоритм вирішення даної задачі може бути наступним. За основу вимог абонентів до своєї віртуальним каналах може бути взятий, наприклад, основний цифровий канал (ОЦК). Стандартна швидкість передачі інформації в ОЦК складає 64 кбіт/с. Для організації тракту в потоці E1 (2 048

Мбіт/с) необхідно 32 каналів ОЦК. Тоді, порядок визначення кількості віртуальних каналів в гілки може бути наступний:

$$V_c = \frac{F}{f_{\text{ОЦК}}}, [\text{канали}]$$

Прийнявши такий підхід, визначаємо кількість віртуальних каналів у кожній гілки мережі MPLS та представляємо їх сукупність у вигляді матриці  $V = \{v_{ij}\}$ . У сучасній науково-технічній літературі розглядається ряд методів, які дозволяють матриці  $A = \{a_{ij}\}$  робити визначення сукупності шляхів передачі інформації в напрямках зв'язку. Однак для вирішення завдань управління найбільш прийнятним є метод, розглянутий у [21; 33]. Його особливість полягає в тому, що оперують не матрицею  $A = \{a_{ij}\}$ , а її модифікацією  $\| M \|$ .

Для переходу від  $\| A \|$  до  $\| M \|$  необхідно:

- Елементи  $a_{ij} = 0$ , за винятком головної діагоналі замінити на елементи  $m_{ij}$ .
- Елементи головної діагоналі  $\| M \|$  залишити рівними 0, тобто  $m_{ij} = 0$ .
- Елементи  $a_{ij} = 1$  замінити на  $m_{ij}$ .

В результаті операцій над матрицею  $\| M \|$  отримують матрицю Маршрутів, кожен елемент якої  $\mu_{ij}$  являє собою сукупність шляхів передачі інформації в напрямку зв'язку з переліком, що входять до них гілок.

$$\mu_{37} = \begin{pmatrix} m_{31} + m_{12} + m_{26} + m_{67} \\ \downarrow \\ m_{35} + m_{57} \\ \downarrow \\ m_{39} + m_{92} + m_{27} \end{pmatrix}$$

Приписування надалі кожному елементу значення його пропускну здатності, живучості та якості обслуговування така форма запису дозволяє спростити процес розрахунку необхідних характеристик мережі зв'язку. Таким чином, результатом виконання даного етапу є матриця  $M = \{\mu_{ij}\}$  сукупності шляхів передачі інформації [14].

Використання MPLS поверх ATM є досить активним, особливо для транспортування мережами ATM трафіку IP. ATM-комутатори, конфігуровані для підтримки MPLS (ATMLSR), виконують протоколи маршрутизації TCP / IP

і використовують пересилку даних комірками фіксованої довжини – 53 байти. У середині цих ATM-LSR верхня мітка MPLS поміщається у поле ідентифікаторів віртуальних каналів у заголовку комірки ATM, а дані про стек міток MPLS – у поле даних комірок ATM.

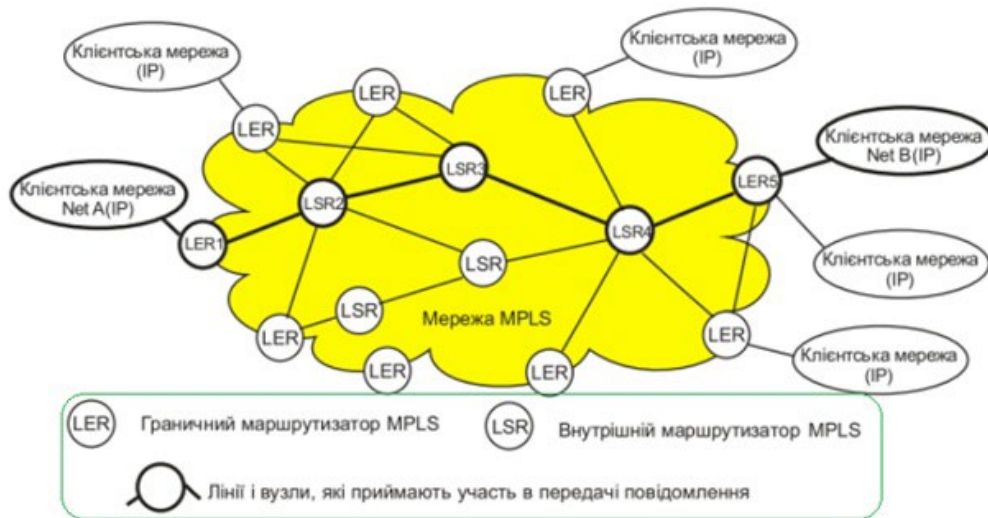


Рис. 2.6. Схематичне зображення архітектури мережі MPLS

*Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [25]*

Процес передачі інформації при використанні технології MPLS характерний тим, що обслуговування кожної заявки починається з формування тунелю.

Ієрархічна побудова мережі MPLS має більш складну багатодоменну структуру, але надає ряд переваг, особливо в майбутньому, використовуючи мережу MPLS для передачі мультисервісного трафіку. В даний час концепції побудови сучасних мереж MPLS-мереж операторського класу. Провідні виробники обладнання для мереж MPLS пропонують нові мережеві архітектури, орієнтовані на надання послуг відповідно до вимог NGN. Доцільно будувати мережі MPLS у вигляді багатодоменної ієрархічної структури.

Наприклад, у структурі мережі MPLS з декількох доменів маршрутизацію, засновану на принципі «OSPF області», коли маршрутні зміни за протоколом OSPF не поширюються по всій мережі, а зосереджуються лише в одному домені. З метою побудови ієрархічної мережі MPLS в мережу вводяться

транзитні граничні вузли TPE, які одночасно служать також відбивачем маршруту (RR-вузли) [18].

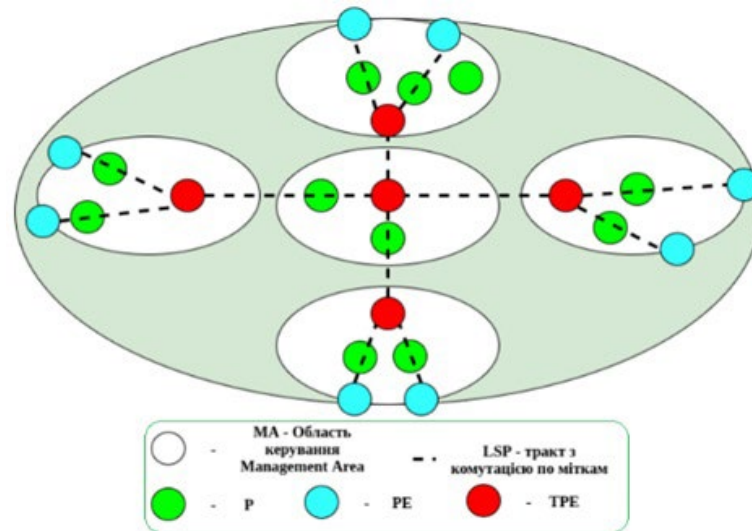


Рис. 2.7. Структура ієрархічної мережі MPLS

*Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [18]*

Перший IP-пристрій на вході магістральної IP- мережі – це прикордонний маршрутизатор PE, встановлений на кінцевій станції магістральної мережі та виконує деякі аналогічні функції з АМТС (в сенсі 60 підключення периферійних клієнтських мереж). Як зазначено, ієрархічна мережа MPLS додатково вмикає транзитні маршрутизатори (TPE), підключені на основі «кожен до кожного», які служать ВАК (вузол автоматичного комутації) з точки зору концентрації трафіку та організації зв'язків між різними територіями. У мережі MPLS без TPE потрібно встановити LSP між маршрутизаторами PE по типу «кожен з кожним», кількість яких (пропорційна квадрату кількості вузлів PE) у великій мережі буде дуже великою.

За наявності транзитних вузлів кількість з'єднань різко зменшується, оскільки кожен PE переходить до власного транзитного вузла TPE, який з'єднаний з усіма іншими TPE, внаслідок чого кожен вузол PE може підключитися до будь-якого іншого вузла PE в ні більше двох транзитних вузлів TPE. Якщо в структурі мережі MPLS ми вводимо вимогу, щоб кожен вузол PE виходив на два TPE та вводив обмеження кількості транзитів (не



більше двох), то мережа MPLS просто вирішує питання бронювання та вирішує проблема циклічного пакету.

Незалежно від архітектури, MPLS-мережі, що управляють трафіком з різними класами обслуговування, повинні використовувати технологію MPLS-TE з можливістю резервування ресурсів пропускної здатності при організації LSP, які зазвичай називаються тунелями LSP в технології MPLS-TE. Слід зазначити, що LSP можна організувати кількома способами:

- без резервування смуги пропускання і з резервування смуги;
- з жорстким виділенням смуги пропускання і з динамічним виділенням смуги пропускання (жорсткі і гнучкі LSP, відповідно).

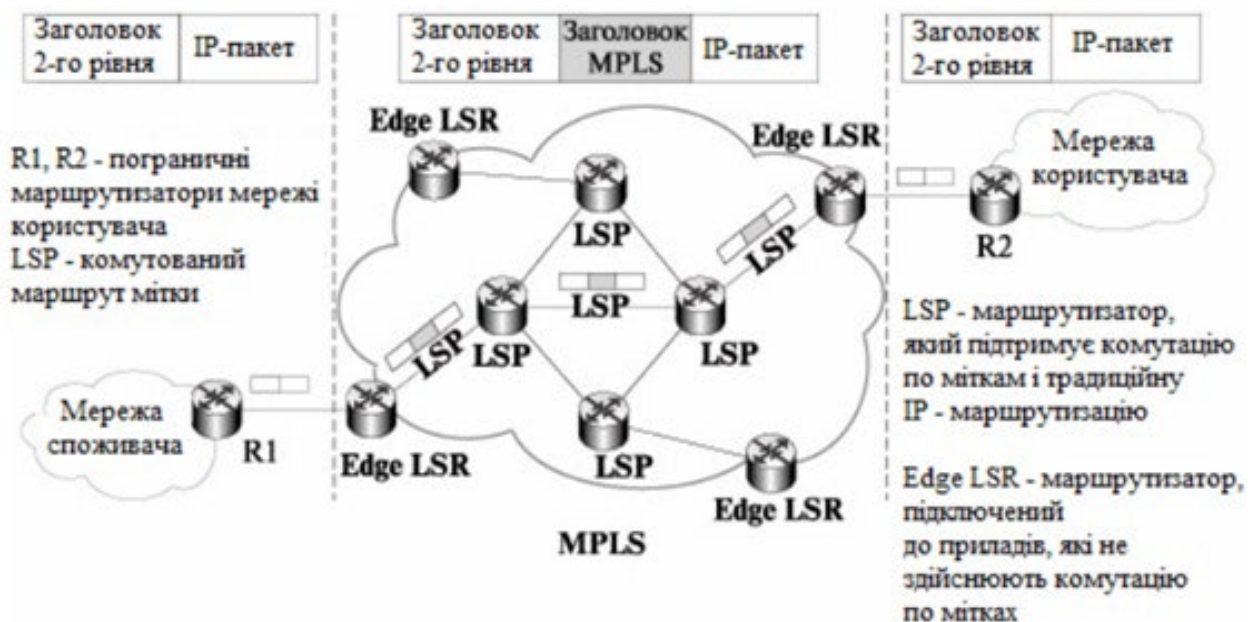


Рис. 2.8. Фрагмент MPLS-мережі

Джерело: Результати власних досліджень на основі систематизації наукової літератури [21]

## РОЗДІЛ 3.

### ВПЛИВ РІЗНИХ МЕТОДІВ КОНВЕРГЕНЦІЇ НА ЯКІСТЬ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

#### 3.1 Порівняльний аналіз застосування методів конвергенції наземних спутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень

Систематизувавши наукову літературу за напрямком домлідження проведемо порівняння досліджуваних у роботі методів конвергенції.

Проаналізувавши основні методи конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень ми описали головні завдання та функціональні блоки «концепції мережі керування телекомунікаціями» (TMN). Приведена її фізична архітектура та сказано, що вона містить компоненти, які є фізичною реалізацією функціональних блоків і мережі передавання даних, а також інтерфейси, призначені для взаємодії між ними.

Складність і висока вартість планування, розгортання і введення в експлуатацію сучасних мереж NGN на базі ефективних телекомунікаційних технологій вимагають вдосконалення науково-методичного апарату, який дозволив би приймати обґрунтовані рішення з урахуванням мінімізації витрат на каналотворююче і лінійне устаткування з урахуванням забезпечення заданих норм по пропускній спроможності і якості обслуговування. Все це визначило необхідність подальших наукових досліджень в цій предметній області, а саме, рішення актуальної наукової задачі по розробці вдосконалених методів оцінки якості обслуговування і пропускнуї спроможності мережі MPLS, що тунелює, при обслуговуванні навантаження реального часу [62].

Окремо проаналізовано концепцію TINA (Telecommunications Information Networking Architecture) та зроблено висновок, що вона є інтегрованою архітектурою мережевого інформаційного забезпечення телекомунікацій, яку застосовують до будь-яких типів послуг та мереж, але спрямованою вона є, в основному, на підтримку надання широкосмугових послуг, послуг мобільності

та інформаційних послуг. Принципи TINA спрямовано на відокремлення досить стабільних функцій оперативного та експлуатаційного керування від функцій розробки послуг, які вимагають гнучкості, динамічності та стрімкомінливих мережевих технологій.

Від інтелектуальної мережі IN TINA запозичила ідею відокремлення функцій надання послуг від функцій комутації, а також принципи функціонального моделювання. У концепції TINA комутаційні системи подано як набір простих функцій комутації, керованих об'єктами, які розміщені в терміналах і на серверах, сумісних із так званим середовищем розподіленого оброблення (Distributed Processing Environment, DPE). Архітектура TINA передбачає поділ застосувань і середовища DPE, яке підтримує їх функціонування. Крім того, TINA розподіляє все програмне забезпечення на застосування, які забезпечують послуги, й застосування, які забезпечують загальний контроль мережевих ресурсів та керування ними [16].

Однією з технологій, які сприяли згаданій революції є технологія MPLS (Multiprotocol Label Switching). MPLS є універсальним розв'язанням проблем якості обслуговування (QoS), які стоять перед пакетними мережами на сьогоднішній день. MPLS забезпечує високу швидкість передачі даних, масштабованість, оптимізацію розподілу трафіку та ефективну маршрутизацію в пакетних мережах IP.

Складність математичного опису процесу функціонування мережі MPLS створює певні труднощі в отриманні ефективних рішень виникаючих завдань. Тому в даний час, при достатньо глибокої теоретичної опрацювання таких питань як визначення сукупності шляхів передачі інформації в напрямках зв'язку, оперативне коригування плану розподілу навантаження у разі структурних змін в мережі, мало прийнятних для практики рішень таких важливих питань, як визначення відхилень якості обслуговування від необхідних норм [61].

Серед особливостей мережі MPLS слід віднести, що напрями зв'язку тут представляють собою сукупність тунелів, сформованих з використанням протоколів OSFP, LDP, RSVP, LDP-TE, RSVP-TE.

Таблиця 3.1

**Порівняння технічних характеристик досліджуваних методів  
конвергенції наземних та безпілотних телекомунікаційних рішень**

	TMN	NGN	MPLS	TINA
Використовуваний транспортний протокол	UDP	TCP	Вихідний IP	HTTP
Надійність операторського класу	Ні	Ні	Так	Ні
Підтримка трафіку “багато точок - точка”	Ні	Так	Так	Так
Підтримка мовного пересилання	Ні	Ні	Ні	Ні
Підтримка зливання LPS	Так	Так	Так	Так
Явна маршрутизація	3 не чіткими ділянками маршруту	3 чіткими ділянками маршруту	3 чіткими ділянками маршруту	3 чіткими ділянками маршруту
Перемаршрутизація LPS	Ні	Так	Так	Ні
Закріплення маршруту	Так	Так	Так, шляхом запису маршруту	Так
Витіснення потоків в LPS	Так, на основі пріоритету	Так, на основі пріоритету	Так, на основі пріоритету	
Засоби безпеки	Так	Так	Так	Так
Захист LPS	Так	Так	Так	Ні
Стан LPS	Жосткий	Жосткий	Не жосткий	Не жосткий
Регенерація станів LPS	Не потребується	Не потребується	Періодична, по ділянках	Періодично
Резервування спільно використовуваних ресурсів	Ні	Ні	Так	Ні
Обмін параметрами трафіку	Так	Так	Так	Так
Керування трафіком	В прямому напрямку	В прямому напрямку	В оберненому напрямку	В оберненому напрямку
Авторизація користувачів	Неявна	Неявна	Явна	Неявна
Індикація протокола рівня 3	Ні	Ні	Так	Ні
Обмеження в залежності від класу ресурсу	Так	Так	Ні	Так

*Джерело: Результати систематизації наукової літератури [19]*

В процесі обслуговування заявок цей ресурс розбивається на віртуальні канали необхідної пропускної здатності [14].

Детально охарактеризовано технологію MPLS та констатовано, що в рамках технології MPLS на поточний момент існує три можливих варіанти організації віртуальних мереж: це BGP-MPLS VPN, VR VPN і VPLS. Для аналізу показників оперативності інформаційного обміну мережі проведений розрахунок швидкості передачі корисного навантаження.

*Таблиця 3.2*

### **Порівняльна характеристика технологій побудови локальної мережі**

Характеристика	Ethernet	Token Ring	FDDI
Бітова швидкість	10 (100) Мбіт/с	4, 16 Мбіт/с	100 Мбіт/с
Топологія	Загальна шина, зірка	Зірка, кільце	Подвійне кільце дерев
Метод доступу	CSMA / CD	Пріоритетна Система резервування	Доля від часу обороту маркера
Середовище передачі даних	Товстий коаксіал, тонкий коаксіал, вита пара, оптичне волокно	Екранована та неекранована вита пара, оптичне волокно	Оптичне волокно, неекранована вита пара 5 категорії
Максимальна довжина мережі (без мостів)	2500 м	4000 м	200 км (100 км на кільце)
Максимальна відстань між вузлами	2500 м	100 м	2 км (не більше 11 дБ втрат між вузлами)
Максимальна кількість вузлів	1024	260 – екранована вітої пари 72 – неекранована вита пара	500 (1000 з'єднань)

*Джерело: Результати систематизації наукової літератури [19]*

### **3.2 Застосування отриманих результатів для вдосконалення бездротового зв'язку і управління БПЛА**

В даному дослідженні ми планували використання методу статистичного моделювання дробового броунівського руху для вдосконалення бездротового зв'язку і управління БПЛА шляхом моделювання процесів трафіку і навантаження в комп'ютерних мережах. Метод використовує властивість, що

дробовий броунівський рух має стаціонарні прирощення, і буде реалізацією руху із заданою проекцією.

Визначення 1. Узагальнений Вінерівський процес (дробовий броунівський рух) з індексом Херста  $H \in (0, 1)$  називається гаусівським процесом  $W_H(t)$ ,  $t \in [0, 1]$  такі, що  $W_H(0) = 0$ ,  $EW_H(t) = 0$  і кореляційною функцією відносної вологості:

$$R_H(t, s) = \frac{1}{2} \left( |t|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H} \right)$$

Якщо  $H = 1/2$ , то отримуємо стандартний Вінерівський процес.

Вінерівський процес  $W(t)$  - це незалежний процес зростання. Дробове Броунівський рух  $W_H(t)$  - це процес зі стаціонарними прирощеннями.

Тоді випадковий процес  $w(t) = W_H(t + \Delta) - W_H(t)$  з фіксованим  $\Delta \in$  стаціонарним гаусівським процесом з кореляційною функцією.

$$Ew(t+\tau)w(t) = \frac{1}{2} \left( |\tau+\Delta|^{2H} + |\tau-\Delta|^{2H} - 2|\tau|^{2H} \right)$$

І спектральна густина :

$$g(\lambda) = \frac{A^2}{\pi} \left( \frac{1 - \cos(\lambda\Delta)}{|\lambda|^{2H+1}} \right), \quad \lambda \in (-\infty, +\infty)$$

де:

$$A^2 = \left( \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1 - \cos(\lambda)}{\lambda^{2H+1}} d\lambda \right)^{-1} = \left( -\frac{2}{\pi} \Gamma(-2H) \cos(H\pi) \right)^{-1}$$

Оскільки  $W_H(0) = 0$ , то для будь-якої моделі дрібного броунівського руху можна уявити:

$$W_H(t+\Delta) = W_H(t) + w(t)$$

Моделювання дробового броунівського руху зводиться до моделювання гаусівського стаціонарного процесу.

Нехай  $\xi(t)$  - реальний гаусіан стаціонарного випадкового процесу з кореляційною функцією  $R(\tau)$  і спектральною функцією:

$$F(\lambda), \quad R(\tau) = \int_0^{\infty} \cos(\lambda t) dF(\lambda)$$

Гаусіан стаціонарного випадкового процесу можна представити у вигляді:

$$\xi(t) = \int_0^{\infty} \cos(\lambda t) d\xi_1(\lambda) + \int_0^{\infty} \sin(\lambda t) d\xi_2(\lambda)$$

де  $\xi_1(t)$  та  $\xi_2(t)$  - центровані і некартельовані випадкові процеси, такі що при  $0 < \lambda_1 < \lambda_2$  він має місце:

$$\begin{aligned} E(\xi_1(\lambda_2) - \xi_1(\lambda_1))^2 &= F(\lambda_2) - F(\lambda_1), \\ E(\xi_2(\lambda_2) - \xi_2(\lambda_1))^2 &= F(\lambda_2) - F(\lambda_1). \end{aligned}$$

Нехай  $D_\Lambda$  - деяке розбиття інтервалу  $[0, \Lambda]$   $D_\Lambda : 0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_n = \Lambda$ . Модель випадкового процесу  $\xi(t)$  може бути представлена у вигляді

$S_n(t, \Lambda) = \sum_{i=0}^{n-1} [\cos(\lambda_i t) \eta_{1i} + \sin(\lambda_i t) \eta_{2i}]$ , де  $\{\eta_{1i}, \eta_{2i}\}$  - центрована некорельована чітка субгаусівська випадковість:

$$E(\eta_{1i})^2 = E(\eta_{2i})^2 = F(\lambda_{i+1}) - F(\lambda_i).$$

Тобто випадковий процес  $w(t)$  можна представити у вигляді:

$$w(t) = \int_0^{\infty} \cos(\lambda t) d\xi_1(\lambda) + \int_0^{\infty} \sin(\lambda t) d\xi_2(\lambda).$$

Для розділу  $D_\Lambda : 0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_n = \Lambda$  модель випадкового процесу  $w(t)$  має вигляд:

$$w_n(t, \Lambda) = \sum_{k=0}^{n-1} (\sin(\lambda_k t) X_k + \cos(\lambda_k t) Y_k),$$

де  $\{X_k, Y_k\}$  - некорельовані чітко субгаусівські випадкові величини з  $E X_k$

$$= E Y_k = 0 \text{ і } E(X_k)^2 = E(Y_k)^2 = \int_{\lambda_k}^{\lambda_{k+1}} g(\lambda) d\lambda.$$

Нехай випадковий процес  $X(t)$  і всі  $X_n(t, \Lambda)$  належать деякому функціональному простору  $A(T)$  з нормою  $\|\cdot\|$ . Нехай дано два числа:  $\delta > 0$  і  $0 < \varepsilon < 1$ .

Визначення 2. Модель  $X_n(t, \Lambda)$  апроксимує процес  $X(t)$  з надійністю  $1-\varepsilon$  і точністю  $\delta$  в нормі простору  $A(T)$ , якщо існує нерівність:

$$P\{\|X(t) - X_n(t, \Lambda)\| > \delta\} \leq \varepsilon.$$

Нехай для  $D_\Lambda$  він містить:  $\lambda_{i+1} - \lambda_i = \frac{\Lambda}{n}$  та  $\frac{T\Lambda}{n} \leq 1$ .

Теорема 1. Модель  $W_n(t, \Lambda)$  апроксимує процес  $w(t)$  з надійністю  $1-\varepsilon$  і точністю  $\delta$  у вигляді простору  $L_2(T)$ , якщо для чисел  $\Lambda$  і  $n$  виконуються

$$\text{нерівності: } G_{2n,\Lambda} < \delta^2 \text{ та } \exp\left\{\frac{1}{2}\right\} \frac{\delta}{\sqrt{G_{2n,\Lambda}}} \exp\left\{-\frac{\delta^2}{2G_{2n,\Lambda}}\right\} \leq \varepsilon,$$

$$\text{Де } G_{2n,\Lambda} = \frac{T^3 \Lambda^2}{3n^2} \int_0^\Lambda g(\lambda) d\lambda + T \left( \int_\Lambda^\infty g(\lambda) d\lambda \right).$$

$$\text{Для чисел } \Lambda \text{ і } n \text{ ставимо: } \Lambda = \left( \frac{3n^2}{T^3} \right)^{\frac{1}{2H+2}},$$

$$G_{2n} = T^{\frac{3H}{H+1}} \left( 1 + \frac{T}{H} \right) \left[ (3n^2)^{\frac{H}{H+1}} \right]^{-1}.$$

У запропонованій математичній моделі мережа представляється у вигляді графа  $G = (V, E)$ , де  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  та  $E = \{1, 2, \dots, M\}$  - множини маршрутизаторів і  $M$  ліній зв'язку між ними. Пряма лінія зв'язку  $m$  має місткість  $c_m$  (в одиницях / сек). Уся множина вузлів в мережі MPLS розбивається на дві підмножини:

$V^+ = \{V_i^+, i=1, n_{LER}\}$  - множина граничних маршрутизаторів LER і  $V^- = \{V_i^-, i=1, n_{LSR}\}$  - множина комутаторів міток LSR.

У свою чергу кожен елемент множини  $V^+$  може бути і джерелом трафіку, і одержувачем. Якщо маршрутизатор є джерелом трафіку, то розуміється, що на даний маршрутизатор надходить трафік з суміжної мережі (IP, MPLS, ATM або ін.). Трафік має бути доставлений на вузол одержувача, який також є точкою дотику із суміжними мережами. Будемо розглядати випадок, коли кожен граничний маршрутизатор LER є і джерелом, і одержувачем, а LSR не може бути одержувачем трафіку, що надійшов на нього із суміжної мережі.

Припустимо, що в кожен момент  $t \in T$  на один із маршрутизаторів надходить трафік інтенсивністю  $\lambda(t)$ , що належить до одного з класів  $\lambda$  обслуговування  $q \in Q$  з вимогами QoS, якому відповідають значення максимально допустимої затримки  $\tau_q$  і максимально допустимого відсотку втрат  $l_q$ . Весь вхідний трафік розбивається на потоки класів обслуговування



$F^q = [f_{P_y}^q(t)]$  таким способом, щоб забезпечити передачу вимог усіх класів  $Q(t)$  у повному обсязі. Тоді множина всіх каналів QoS трафіку  $Y$  (в одній лінії зв'язку  $m$  може існувати множина каналів  $y \in Y$ ) має вигляд:

$$Y = Y(d_y, P_y, L_y),$$

де  $d_y$  – смуга пропускання каналу;  $P_y = \{P_y^1, \dots, P_y^{L_y}\}$  – допустима множина шляхів для шляху  $L_y$  певна для кожного каналу трафіку.

У цьому випадку інтенсивність трафіку можна позначити як  $\lambda_{P_y}^q(t)$ , що означає таке: в момент  $t$  на граничний маршрутизатор надходить трафік інтенсивністю  $\lambda$ , який належить до  $q$ -го класу обслуговування, який необхідно доставити на вихідний маршрутизатор по будь-яких шляхах із множини  $P_y$ , щоб не перевищити заданих максимально допустимих значень затримки  $\tau_q$  і максимально допустимого відсотку втрат.

Кожен вузол мережі  $V$  в  $t$ -й момент характеризується продуктивністю  $\mu$ , коефіцієнтом відносних втрат  $X_V^q(t) \in X$  і середнім часом очікування пакета в черзі  $T_V^q(t) \in T$ . На величину втрат для всіх вузлів мережі накладаються обмеження:

$$0 \leq X_V^q(t), \sum_V^{P_y} X_V^q(t) \leq l_q,$$

де  $V = \overline{1, P_y}$ ,  $l_q$  – заданий максимально допустимий відсоток втрат. Втрати визначаються як відношення кількості відкинутих даних до кількості даних, які надійшли на обслуговування. Обмеження, що накладаються на час затримки для всіх вузлів мережі  $V = \overline{1, P_y}$ , визначаються в аналогічний спосіб:

$$0 \leq T_V^q(t), \sum_V^{P_y} T_V^q(t) \leq \tau_q,$$

де  $V = \overline{1, P_y}$ ,  $\tau_q$  – задане максимально допустиме значення затримки. Значення вартості маршрутизації  $c_m$  присвоюється лінії зв'язку  $m$  і може

залежати від низки параметрів: швидкості, довжини, надійності та ін. Вартість шляху  $P_y^l$  дорівнює сумі вартості ліній зв'язку:

$$C_y^l = \sum_{m \in P_y^l} c_m.$$

Якщо  $x_y^l(t)$  представляє пропускну здатність, яка спрямовується на допустимий шлях  $P_y^l$  каналу передачі у трафіку  $\lambda_{P_y^l}^q(t)$ , тоді виконується:

$$\sum_{l \in \Gamma: l=1}^{L_y} x_y^l(t) = d_y, \quad \forall y \in Y, \quad \forall l \in \{1, \dots, L_y\}.$$

Загальне навантаження на лінії зв'язку  $m$  визначається за формулою:

$$f_m = \sum_{\lambda_{P_y^l}^q(t) \in Y} \sum_{l=1}^{L_y} a_{y,j}^m x_y^l(t), \quad \forall m \in E,$$

де  $a_{y,j}^m = 1$ , якщо шлях  $P$  у використовує лінію зв'язку  $m$ ,  $a_{y,j}^m = 0$  в іншому випадку;  $x_y^l(t)$  – пропускну здатність згідно вище приведеного рівняння.

Представлена модель дозволяє розробити комплекс методів для оптимізації характеристик і структур мереж із технологією MPLS.

В даному дослідженні також розглянемо використання алгоритму Флойда-Уоршелла для пошуку найкоротших шляхів при здійсненні керування БПЛА оператором.

Формалізуємо поставлену задачу за допомогою алгоритму шляхом формування схеми з використанням апарату систем алгоритмічних алгебр Глушкова (САА). Використовуючи позначення, сформуємо ряд кон'юнктивних умов для скорочення запису формули алгоритму:

$$\alpha_1(m, i, j) = isEdge(m, i) \wedge isWay(i, j),$$

$$\alpha_2(m, i, j) = isEdge(j, m) \wedge isWay(i, j),$$

$$\alpha_3(m, i, j) = isWay(i, m) \wedge isWay(m, j).$$

Умови  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  вказують на існування відповідно шляхів  $d_{mj}^i$ ,  $d_{im}^j$ ,  $d_{ij}^m$ .

Запишемо умови оптимальності шляхів  $d_{mj}^i$ ,  $d_{im}^j$ ,  $d_{ij}^m$  на відповідному кроці ітераційного процесу:

$$\beta_1 = (\overline{isWay(m, j)}) \vee (g_{mi} + d_{ij} < d_{mj}) \vee \\ \vee ((g_{mi} + d_{ij} = d_{mj}) \wedge (edgeNum(i, j) + 1 < edgeNum(m, j))),$$

$$\beta_2 = (\overline{isWay(i, m)}) \vee (g_{jm} + d_{ij} < d_{mi}) \vee \\ \vee ((g_{jm} + d_{ij} = d_{mi}) \wedge (edgeNum(i, j) + 1 < edgeNum(i, m))),$$

$$\beta_3 = (\overline{isWay(i, j)}) \vee (d_{im} + d_{mj} < d_{ij}) \vee \\ \vee ((d_{im} + d_{mj} = d_{ij}) \wedge (edgeNum(i, m) + edgeNum(m, j) < edgeNum(i, j))).$$

Під оптимальністю швидкості керування БПЛА оператором розуміється менша загальна довжина шляху або, якщо довжини порівнюваних шляхів рівні, менша кількість ребер, які необхідно пройти. Оперуючи умовами, запишемо кожен з кроків алгоритму у вигляді формули:

1.  $SubDanc1(m) = \{ \{_{j \in \{1..m\}} \{_{i \in \{1..m\}} \alpha_1 \beta_1 ( ( setWay(m, i, j) \vee E) \vee E) \times (++)i) \times (++)j) \}$ .
2.  $SubDanc2(m) = \{ \{_{i \in \{1..m\}} \{_{j \in \{1..m\}} \alpha_2 \beta_2 ( ( setWay(i, m, j) \vee E) \vee E) \times (++)j) \times (++)i) \}$ .
3.  $SubDanc3(m) = \{ \{_{i \in \{1..m\}} \{_{j \in \{1..m\}} \alpha_3 \beta_3 ( ( setWay(i, j, m) \vee E) \vee E) \times (++)j) \times (++)i) \}$ ,

Використовуючи позначення, можна сформулювати послідовну регулярну схему (ПРС) алгоритму:

$$Dancig = \{_{m > N} SubDanc1(m) \times SubDanc2(m) \times SubDanc3(m) \times (++)m \}.$$

Наведемо приклад практичного використання досліджуваного підходу:

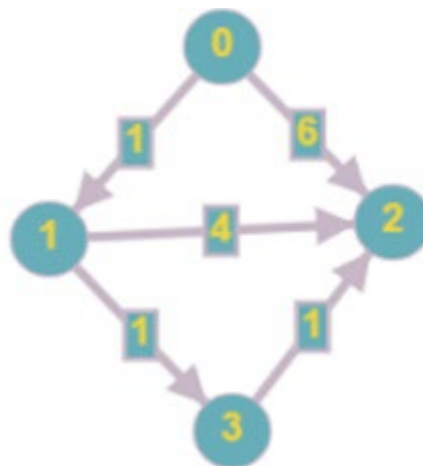


Рис. 3.1. Схематичне зображення пошуку найкоротших шляхів при здійсненні керування БПЛА оператором

Джерело: Результати власних досліджень

Специфіка відпрацювання алгоритму Флойда-Уоршелла.

1 Ітерація ( $k = 0$ )

	0	1	2	3
0	0	1	6	-
1	-	0	4	1
2	-	-	0	-
3	-	-	1	0

$$a(i, j) > a(i, k) + a(k, i) \qquad a(0, 0) > a(0, 0) + a(0, 0)$$

$$0 > 0 + 0 - \text{ні}$$

$$a(i, j) > a(i, k) + a(k, j) \qquad a(0, 1) > a(0, 0) + a(0, 1)$$

$$1 > 0 + 1 - \text{ні}$$

$$a(i, j) > a(i, k) + a(k, i) \qquad a(0, 2) > a(0, 0) + a(0, 2)$$

$$6 > 0 + 6 - \text{ні}$$

Перейдемо до моменту зміни.

2 Ітерація ( $k = 1$ )

	0	1	2	3
0	0	1	6	$\infty$
1	$\infty$	0	4	1
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$
3	$\infty$	$\infty$	1	0

$$a(i, j) > a(i, k) + a(k, j) \qquad a(0, 3) > a(0, 1) + a(1, 3)$$

$$\infty > 1 + 1 - \text{так}$$

$$a(0, 3) = 2$$

	0	1	2	3
0	0	1	6	2
1	$\infty$	0	4	1
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$
3	$\infty$	$\infty$	1	0

І так доки не будуть знайдені всі мінімальні шляхи.

Завдання з пошуку найкоротшого маршруту при здійсненні керування БПЛА оператором шляхом доставки пакетів даних з одного вузла мережі

(хоста) в інший називається завданням маршрутизації. Наведемо реалізацію поставленої задачі мовою програмування C++.

Вхідними даними будуть кількість вершин графа  $n$  ( $1 \leq n \leq 100$ ) та в наступних  $n$  рядках знаходиться по  $n$  чисел, які задають матрицю суміжності графа. Де  $-1$  – це відсутність ребра між вершинами, а будь-яке невід’ємне число – присутність ребра даної ваги. Всі числа по модулю не перевищують 100. На головній діагоналі матриці завжди розташовані нулі.

У вихідних даних отримаємо матрицю найкоротших відстаней між парами вершин, тобто  $n$  рядків по  $n$  чисел.  $j$ -е число в  $i$ -ому рядку повинно дорівнювати вазі найкоротшого шляху з вершини  $i$  у вершину  $j$ . Виводиться шукане максимальна найкоротша відстань. Представимо приклад програмної реалізації досліджуваного алгоритму для мережі інтернет.

```

#include <cstdlib>
#include <iostream> using namespace std;
int main(){
int n;
cout<<«n=«;
cin >> n;
cout<<«Input matrix A / n»;
int a [n] [n];
long long maxr = 0;
for (int i=0; i<n; i++){
for (int j=0; j<n; j++){
cin >> a [i] [j];
}
}
for (int k=0; k<n; k++){ for (int i=0; i<n; i++){
for (int j=0; j<n; j++){
if (i != j && a [i] [k]!= -1 && a [k] [j]!= -1){ if (a[i] [j] == -1){
a [i] [j] = a [i] [k] + a [k] [j];
}
else
{
a [i] [j] = min (a[i] [j], a [i] [k] + a [k] [j]); }
}
}
}
}
cout<< «matrix / n»; for (int i=0; i<n; i++){
for (int j=0; j<n; j++){
cout << a [i] [j] << « «;
}
}
cout<< endl;

```

```

}
for (int i=0; i<n; i++)
{
for (int j=0; j<n; j++)
{
if (a[i] [j] > maxr) maxr = a [i] [j];
}
}

cout << «max rastoyanie = « <<maxr << endl;
}

```

Мови програмування, які можна використати для кросплатформної розробки програм, поділяють на три групи: кросплатформні мови програмування на рівні компіляції – для цих мов є компілятори для різних платформ (C, C++, Pascal, Fortran, Ада тощо); кросплатформні мови на рівні виконання (Java і C#) – результатом роботи компілятора в цих мовах є байт-код, який можна запускати на різних платформах за допомогою віртуальних машин (Java VM для Java і CLR для C#); кросплатформні інтерпретатори – для цих мов є інтерпретатори (PHP, Perl, Python, Tcl, Ruby тощо) для різних платформ [46].

Таблиця 3.3

### Кросплатформні мови програмування на рівні компіляції

Інструментальна оболонка	Підтримувані компілятори / кількість мов програмування	Підтримувані ОС / їхня кількість
1	2	3
Qt Creator	GCC, Clang, MinGW, MSVC, Linux ICC, GCCE, RVCT, WINSCW/8	Linux, OS X, Windows, Unix, iOS, Android, Blackberry 10, WinRT, Embedded Linux, QNX/10
Eclipse	C/C++, Fortran/3	AIX, FreeBSD, HP-UX, Linux, Mac OS X, OpenSolaris, Solaris, QNX, Microsoft Windows, Android (ARM)/10
Free Pascal	Free Pascal Compiler, Object Pascal, частково GNU Pascal, ISO Extended Pascal/4	MS DOS, FreeBSD, Linux, Mac OS X, Microsoft Windows, Sun Solaris, Haiku/7
Lazarus	Free Pascal Compiler/1	Linux, FreeBSD, Mac OS X, Microsoft Windows, Android 5
Code::Blocks	MinGW, GCC C/C++, GNU ARM GCC, GNU AVR GCC, GNU GCC Compiler for PowerPC, Digital Mars C/C++, Digital Mars D, SDCC, Microsoft Visual C++, Borland C++, Watcom, Intel C++, GNU Fortran. GNU	Windows, Linux, Mac OS X, Unix/4
NctBeans IDE	C, C++, Ада/3	Windows, Linux, FreeBSD, Solaris /4

*Джерело: Результати власних досліджень*

Як випливає з таблиці 3.3, найпопулярнішими понад десять років є мови програмування C (на січень 2015 р. 16,703 %) та Java (15,528 %), які широко використовують для кросплатформного програмування. Менш популярними є C++ (6,705 %), C# (5,045), PHP (3,784), Python (2,613), Perl (2,256), Delphi/Object Pascal (0,837 %).

C++ - універсальна мова програмування високого рівня з підтримкою декількох парадигм програмування. У 1990-х роках мова програмування C++ стала однією з найуживаніших мов програмування загального призначення. При створенні мови C++ прагнули зберегти її синтаксис сумісний з мовою C. Більшість програм, написаних мовою C, справно працюють і з компілятором мови C++. Нововведеннями мови програмування C++ порівняно з мовою C було: підтримка об'єктно-орієнтованого програмування через класи і об'єкти; підтримка узагальненого програмування через шаблони; доповнення до стандартної бібліотеки; додаткові типи даних; оброблення винятків; простори імен; вбудовані функції; перевизначення операторів та імен функцій; посилання та оператори управління вільно розподіленою пам'яттю.

Інструкція користувача. Опишемо інструкцію роботи з розробленим кодом (див. додаток роботи). Для запуску програми потрібно завантажити папку «Статистичний аналіз трафіку комп'ютерних мереж». В папці відкрити файл «Статистичний аналіз трафіку комп'ютерних мереж» з розширенням «.cbr» за допомогою програми «Code::Blocks IDE».

Натиснути на кнопку, для запуску програми та здійснити уведення

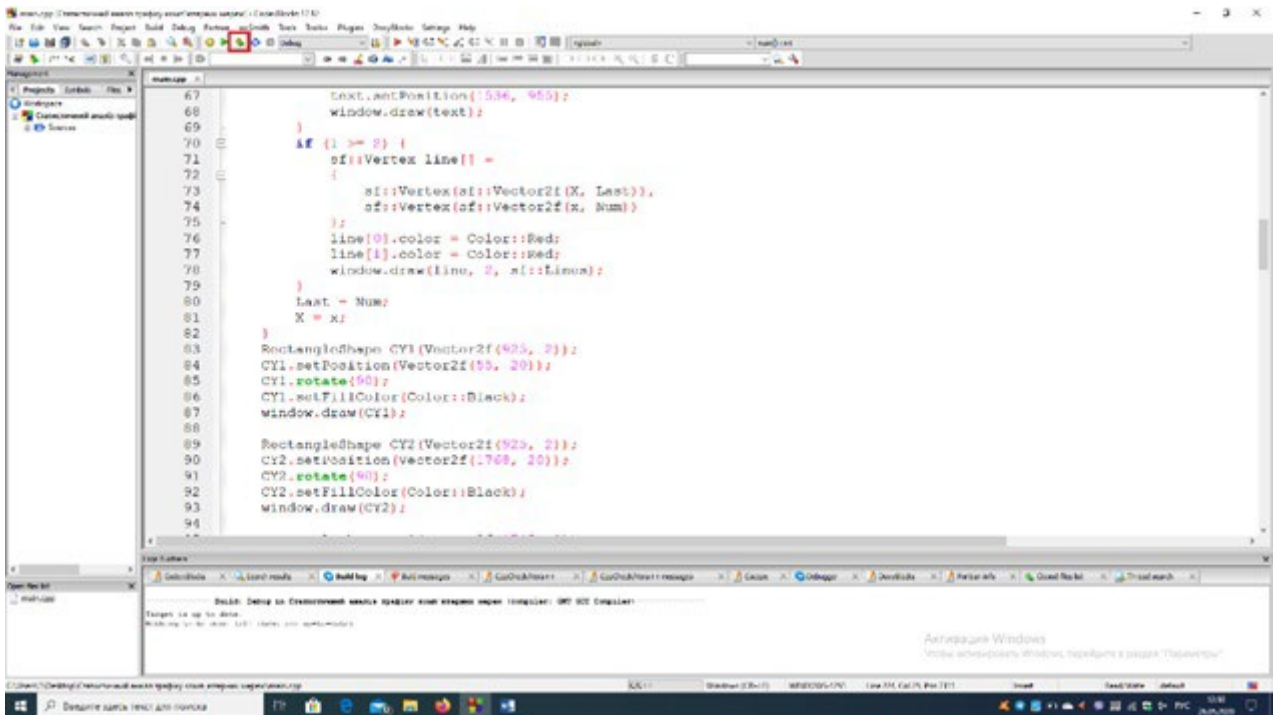


Рис. 3.2. Робоче вікно запуску розробленого коду

*Джерело: Результати власних досліджень]*

В продовження нашого дослідження приведемо програмний код на мові C ++, що проводить статистичну обробку трафіку комп'ютерної мережі. Вихідні дані - 20 000 точок з трафіку.

На рис. 3.3 показано візуалізовані результати оцінки трафіку вдосконалюваної комп'ютерної мережі для здійснення обміну даними під час керування БПЛА оператором, що складається із 20 000 точок з допомогою програмного коду на мові C++. На рис. 3.3 доступна інформація: номер пакета, відносний час отримання пакета (відлік проводиться від першого пакета; параметри відображення часу можна змінити в налаштуваннях), кількість використаних даних трафіку. Конфігурація інтерфейсу може бути легко змінена в меню View.



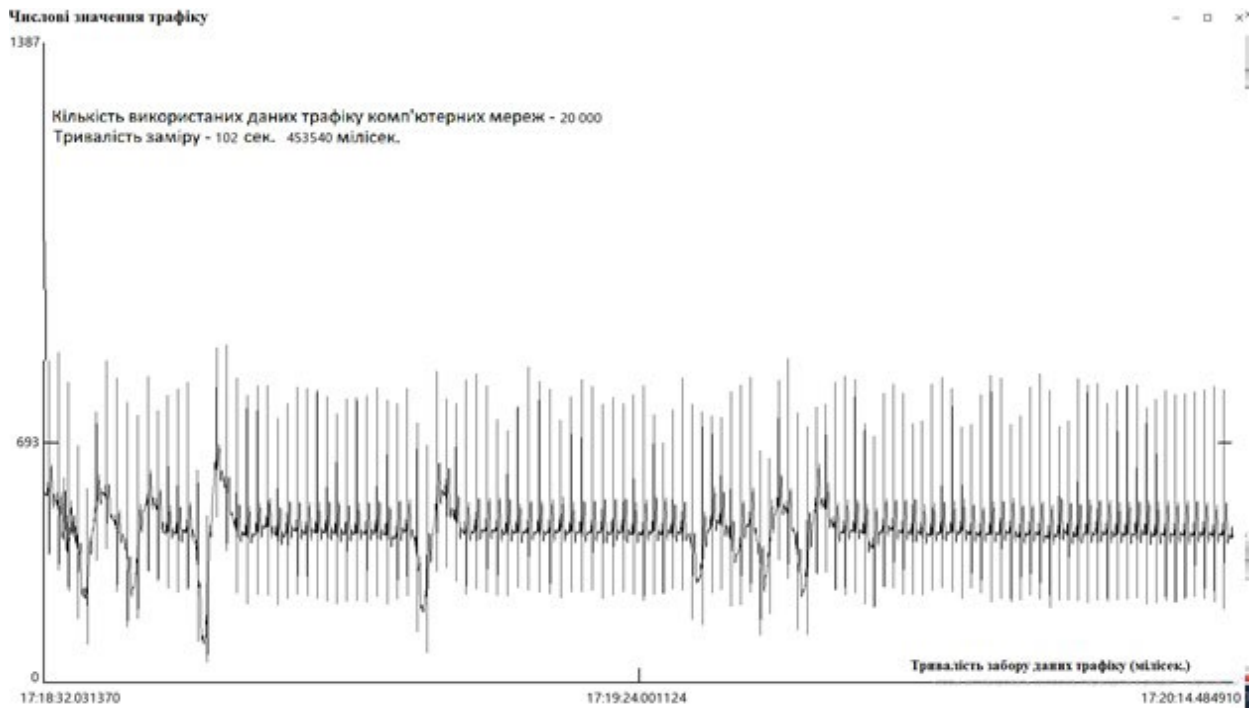


Рис. 3.3. Схематичне зображення зміни трафіку комп'ютерної мережі з часом.

*Джерело: Результати власних досліджень*

На рис. 3.3 зображено частину добового трафіку досліджуваної комп'ютерної мережі, візуалізована з допомогою програмного коду.

Захоплення трафіку комп'ютерної мережі можна здійснювати за допомогою таких методів:

- за допомогою аналізу побічних електромагнітних випромінювань та відновленням у такий спосіб того трафіку, який власне «прослуховується»;
- через відгалуження (апаратне або програмне) трафіку, а також із відсиленням копії його на сніфер;
- «прослуховуванням» мережевого інтерфейсу (цей метод є ефективним за умови використання в сегменті концентраторів («hubs») замість комутаторів («switches»), в іншому випадку метод є дуже малоефективним, оскільки на аналізатор мережевих протоколів потрапляють всього лише окремі фрейми);
- під'єднанням аналізатора мережевих протоколів у розрив каналу;

- через здійснення атаки на мережевому (IP- spoofing), чи каналному (MAC- spoofing) рівні, що призводить до перескерування даних трафіку «жертви» або загалом всього трафіку обраного сегменту на аналізатор з подальшим поверненням інформації на належну адресу.

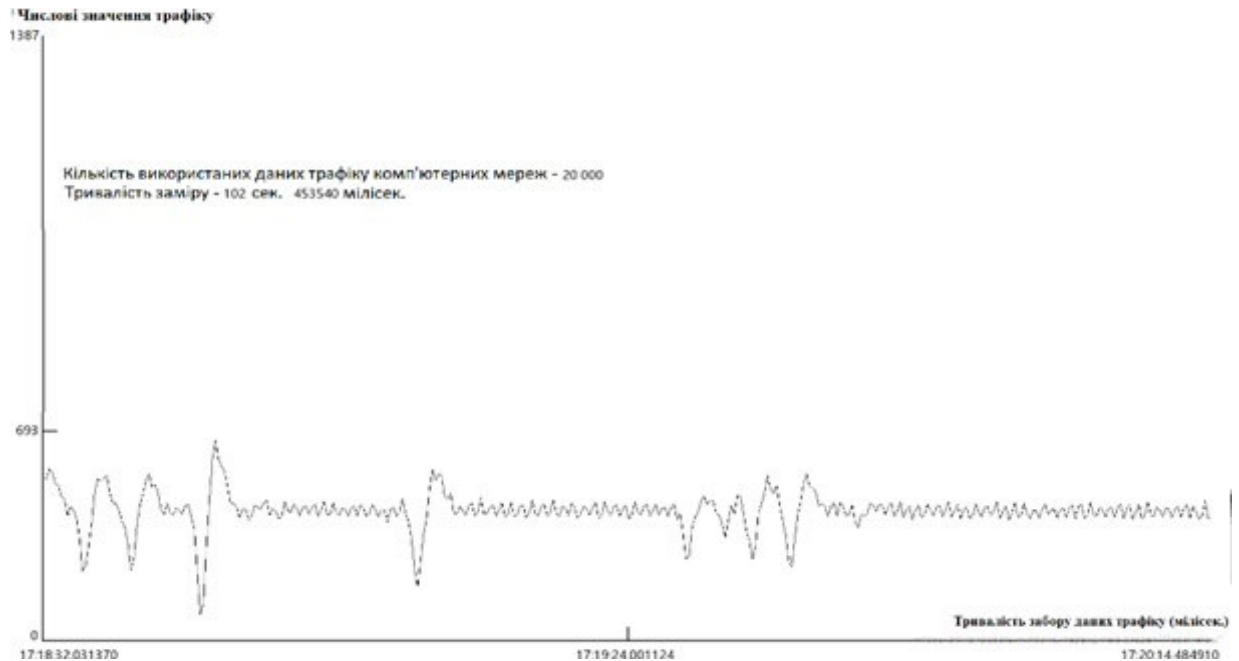


Рис. 3.4. Схематичне зображення трафіку досліджуваної комп'ютерної мережі (тривалий замір)

*Джерело: Результати власних досліджень*

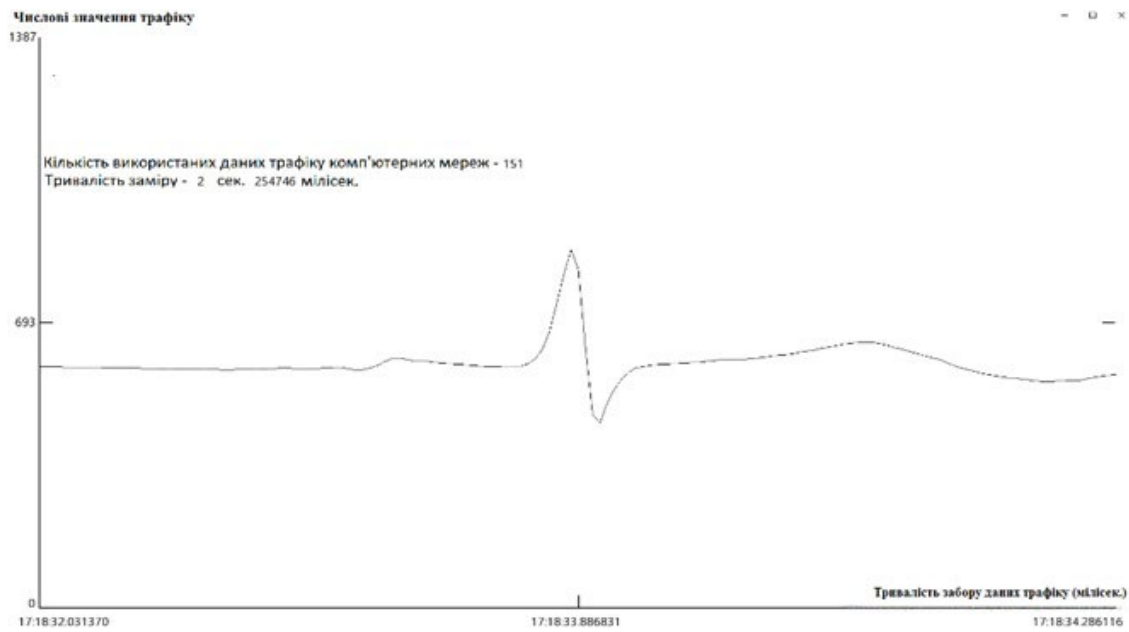


Рис. 3.5. Графічний вигляд трафіку досліджуваної комп'ютерної мережі під час зміни його інтенсивності

*Джерело: Результати власних досліджень*

На рис. 3.4 показано, що графік зміни середньої кількості пакетів має такий самий характер як графік сумарного трафіку. Рис. 3.5 демонструє малу залежність середнього розміру пакетів від завантаження мережі. Встановлено, що характер зміни швидкості передавання пакетів навпаки залежить від завантаження мережі. Швидкість передавання пакетів тим більша, чим менша завантаженість мережі. Для побудови графіку на обчислювався коефіцієнт завантаження мережі як відношення швидкості передавання пакетів до сумарної кількості пакетів.

Приведемо приклад використання Cisco AI Network Analytics для пошуку та усунення неполадок в мережі бездротового зв'язку під час керування БПЛА оператором.

Одним з найпопулярніших програмних продуктів з можливістю тестування є Cisco AI Network Analytics. Це програмне забезпечення включається в себе емулятор мережевого обладнання Cisco Systems з операційною системою Cisco IOS і засіб для тестування КМ. Даний продукт набув великого поширення за рахунок необхідності його застосування для проходження навчання в рамках програм Cisco Network Academy.

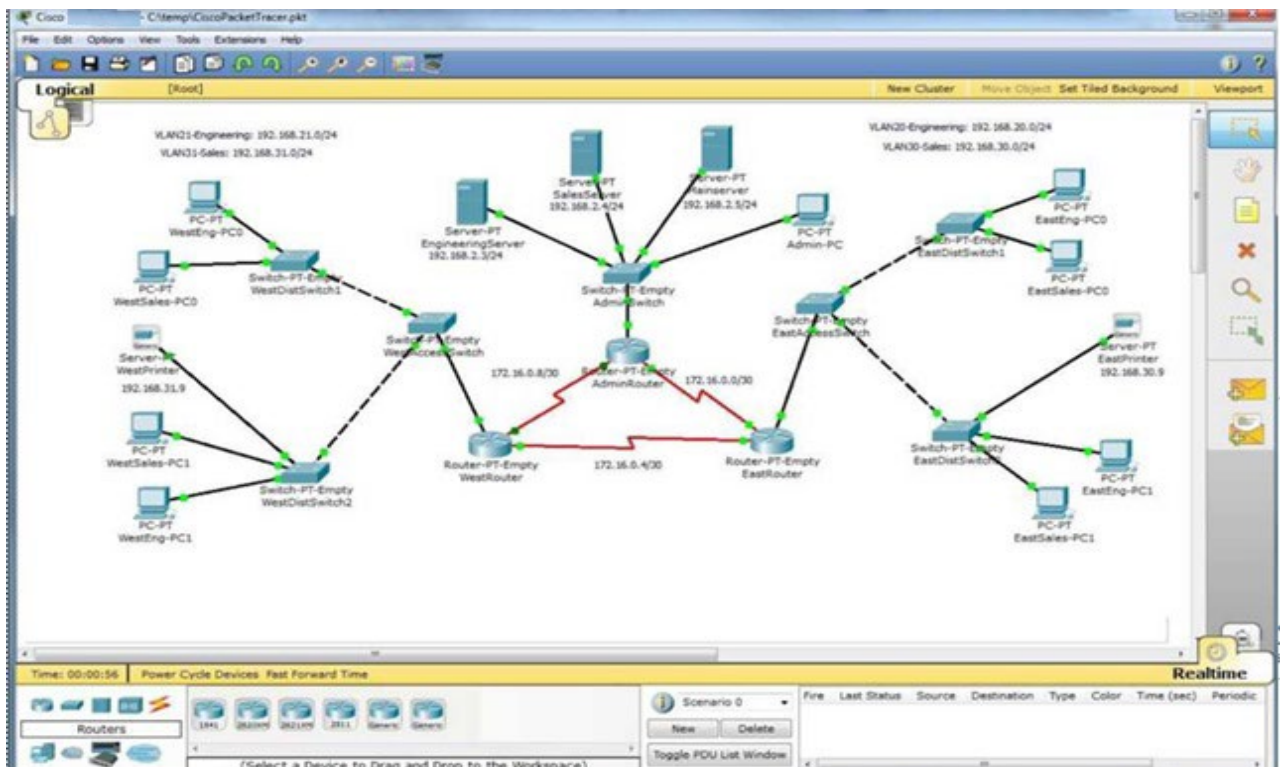
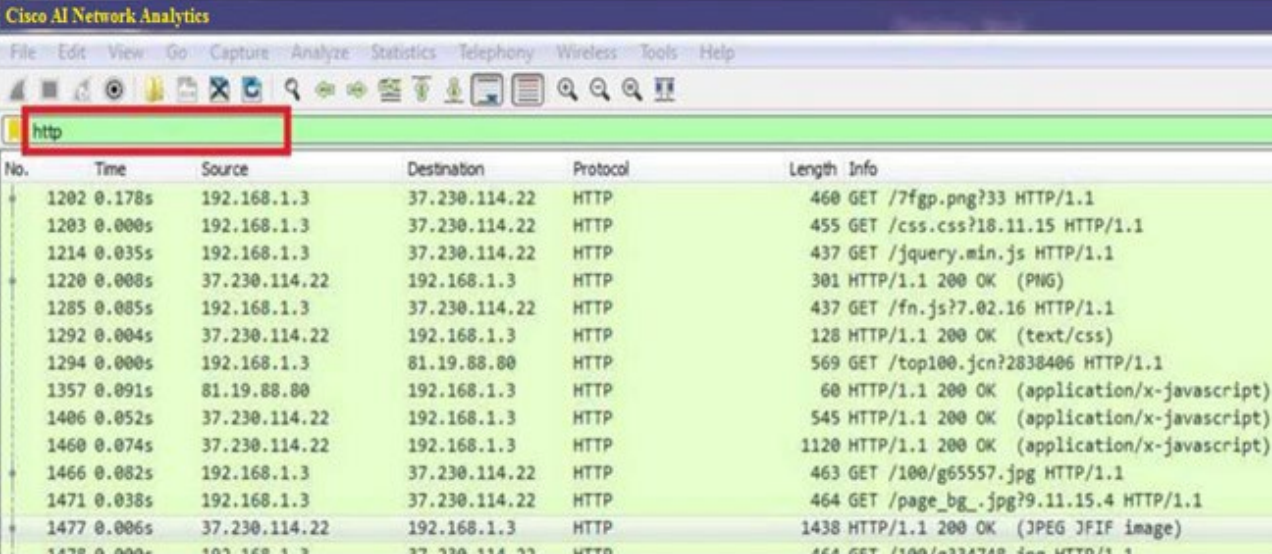


Рис. 3.6. Графічна оболонка Cisco AI Network Analytics

*Джерело: Результати власних досліджень*

За допомогою Cisco AI Network Analytics можливо створювати лабораторні роботи через вбудований помічник, який дозволяє створити еталонну модель, з якою буде порівнюватися конфігурація обладнання, і задати параметри для функціонального тестування: перевірка доступності певного вузла, перевірка коректності встановленого сусідства.

Cisco AI Network Analytics емулює лише апаратну і програмну частину, певного обладнання. Доступ до повноцінного функціоналу Cisco IOS обмежений, реалізація функцій операційної системи залежить від розробників цього програмного продукту. Аналізуючи захоплений трафік локальної мережі, можна дізнатися, що було завантажено на комп'ютер. Розглянемо дану процедуру на основі протоколу http і дізнаємося які зображення були завантажені. Для цього необхідно провести фільтрацію всього трафіку по фільтру http.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1202	0.178s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	460	GET /7fgp.png?33 HTTP/1.1
1203	0.000s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	455	GET /css.css?18.11.15 HTTP/1.1
1214	0.035s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	437	GET /jquery.min.js HTTP/1.1
1220	0.008s	37.230.114.22	192.168.1.3	HTTP	301	HTTP/1.1 200 OK (PNG)
1285	0.085s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	437	GET /fn.js?7.02.16 HTTP/1.1
1292	0.004s	37.230.114.22	192.168.1.3	HTTP	128	HTTP/1.1 200 OK (text/css)
1294	0.000s	192.168.1.3	81.19.88.80	HTTP	569	GET /top100.jcn?2838406 HTTP/1.1
1357	0.091s	81.19.88.80	192.168.1.3	HTTP	60	HTTP/1.1 200 OK (application/x-javascript)
1406	0.052s	37.230.114.22	192.168.1.3	HTTP	545	HTTP/1.1 200 OK (application/x-javascript)
1460	0.074s	37.230.114.22	192.168.1.3	HTTP	1120	HTTP/1.1 200 OK (application/x-javascript)
1466	0.082s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	463	GET /100/g65557.jpg HTTP/1.1
1471	0.038s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	464	GET /page_bg_.jpg?9.11.15.4 HTTP/1.1
1477	0.006s	37.230.114.22	192.168.1.3	HTTP	1438	HTTP/1.1 200 OK (JPEG JFIF image)
1478	0.000s	192.168.1.3	37.230.114.22	HTTP	464	GET /100/e334748.jpg HTTP/1.1

Рис. 3.7. Приклад фільтрування трафіку Cisco AI Network Analytics

*Джерело: Результати власних досліджень*

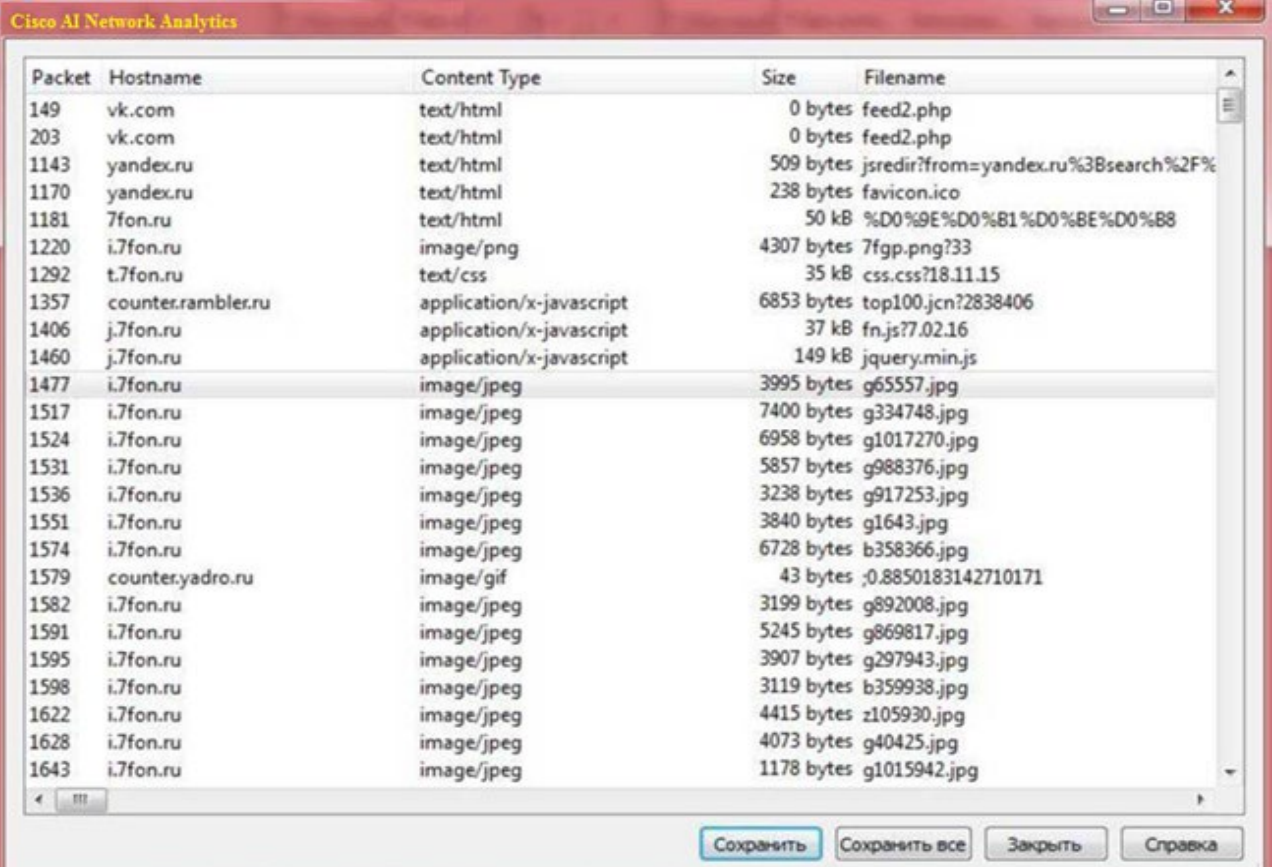
Після того як наш захоплений трафік відфільтрований, він відображає всі пакети, які використовували HTTP протокол. Для знаходження завантажених

зображень необхідно перейти у вкладку export objects і вибрати HTTP. (рисунок 3.7.)

Для того, щоб експортувати завантажені об'єкти, необхідно зберегти або конкретний файл, або всі файли, шляхом збереження їх на робочий стіл.

Таким же самим способом можна здійснити витяг скачаних zip файлів, потокового відео та аудіо.

На даний момент, комплексним рішенням для проведення аналізу скачаних файлів з мережевих технологій з моментальною перевіркою виконаного завдання, це Cisco AI Network Analytics. Даний програмний продукт дозволяє проводити пошук помилок в комп'ютерній мережі, захоплювати трафік, створювати лабораторні роботи, які можна відразу ж перевірити за готовим шаблоном з використанням функціонального тестування: перевірка з'єднання на за допомогою утиліти ping, Перевірка установки сусідства в протоколах маршрутизації EIGRP, OSPF, BGP та інші тести.



The screenshot shows a window titled "Cisco AI Network Analytics" with a table of captured traffic. The table has five columns: Packet, Hostname, Content Type, Size, and Filename. The data is as follows:

Packet	Hostname	Content Type	Size	Filename
149	vk.com	text/html	0 bytes	feed2.php
203	vk.com	text/html	0 bytes	feed2.php
1143	yandex.ru	text/html	509 bytes	jsredir?from=yandex.ru%3Bsearch%2F%
1170	yandex.ru	text/html	238 bytes	favicon.ico
1181	7fon.ru	text/html	50 kB	%D0%9E%D0%B1%D0%BE%D0%B8
1220	i.7fon.ru	image/png	4307 bytes	7fgp.png?33
1292	t.7fon.ru	text/css	35 kB	css.css?18.11.15
1357	counter.rambler.ru	application/x-javascript	6853 bytes	top100.jcn?2838406
1406	j.7fon.ru	application/x-javascript	37 kB	fn.js?7.02.16
1460	j.7fon.ru	application/x-javascript	149 kB	jquery.min.js
1477	i.7fon.ru	image/jpeg	3995 bytes	g65557.jpg
1517	i.7fon.ru	image/jpeg	7400 bytes	g334748.jpg
1524	i.7fon.ru	image/jpeg	6958 bytes	g1017270.jpg
1531	i.7fon.ru	image/jpeg	5857 bytes	g988376.jpg
1536	i.7fon.ru	image/jpeg	3238 bytes	g917253.jpg
1551	i.7fon.ru	image/jpeg	3840 bytes	g1643.jpg
1574	i.7fon.ru	image/jpeg	6728 bytes	b358366.jpg
1579	counter.yadro.ru	image/gif	43 bytes	,-0.8850183142710171
1582	i.7fon.ru	image/jpeg	3199 bytes	g892008.jpg
1591	i.7fon.ru	image/jpeg	5245 bytes	g869817.jpg
1595	i.7fon.ru	image/jpeg	3907 bytes	g297943.jpg
1598	i.7fon.ru	image/jpeg	3119 bytes	b359938.jpg
1622	i.7fon.ru	image/jpeg	4415 bytes	z105930.jpg
1628	i.7fon.ru	image/jpeg	4073 bytes	g40425.jpg
1643	i.7fon.ru	image/jpeg	1178 bytes	g1015942.jpg

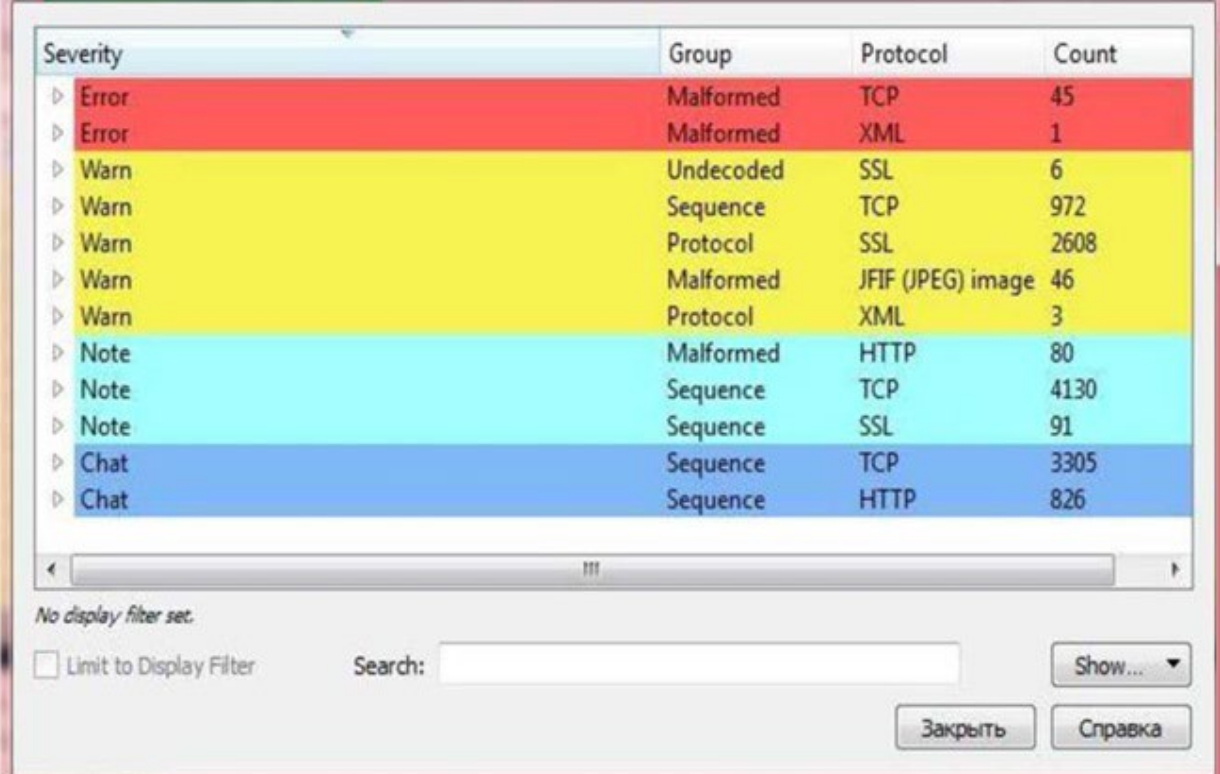
At the bottom of the window, there are four buttons: "Сохранить" (Save), "Сохранить все" (Save all), "Закрыть" (Close), and "Справка" (Help).

Рис. 3.8. Список файлів які можна витягти із захопленого трафіку

*Джерело: Результати власних досліджень*

Режим візуалізації в Cisco AI Network Analytics дозволяє відстежити переміщення даних по мережі, поява і зміна параметрів IP-пакетів при проходженні даних через мережеві пристрої, швидкість і шляхи переміщення IP-пакетів. Аналіз подій, що відбуваються в мережі, дозволяє зрозуміти механізм її роботи і виявити несправності. У процесі аналізу мережевого трафіку локальної мережі за допомогою системного інструменту можна визначити наявність пакетів з помилками або попередженнями.

Для цього існує спеціальний інструмент, передбачений Cisco AI Network Analytics. Expert Information-журнал в якому відображені помилки, попередження, примітки, викликані мережевими «аномаліями» (рис. 3.9).



Severity	Group	Protocol	Count
Error	Malformed	TCP	45
Error	Malformed	XML	1
Warn	Undecoded	SSL	6
Warn	Sequence	TCP	972
Warn	Protocol	SSL	2608
Warn	Malformed	JFIF (JPEG) image	46
Warn	Protocol	XML	3
Note	Malformed	HTTP	80
Note	Sequence	TCP	4130
Note	Sequence	SSL	91
Chat	Sequence	TCP	3305
Chat	Sequence	HTTP	826

No display filter set.

Limit to Display Filter      Search:       Show... ▾

Закреть      Справка

Рис. 3.9. Результати пошуку помилок в КМ за допомогою Cisco AI Network Analytics

*Джерело: Результати власних досліджень*

Cisco AI Network Analytics має досить зручний інтерфейс, в якому відображено поведінку мережі. Наявність такого інструменту дозволяє досить швидко знаходити помилки, ніж аналізувати всі пакети вручну.

В даному вікні відображена інформація, яка ділиться на групи Errors, Warnings, Notes, Chats.

Errors-помилки, виділені червоним кольором.

Warnings-попередження, виділені жовтим кольором.

Notes-примітки, виділені блакитним кольором.

Chat-чат, виділений синім кольором.

Для опису всіх пошуків та перевірок в текстовому вигляді можна використовувати модуль написаний на мові програмування Python.

Приклад, опишемо порядок аналізу даних для вилучення даних – за допомогою Cisco AI Network Analytics з локального конфігураційного файлу комп'ютерної мережі. В даному прикладі описаний скрипт на мові python. Для роботи системи слід підключити модуль `cisco_analyzer`, який дозволяє отримати звіт про конфігурацію обладнання. Можливе отримання звіту по конкретному сервісу.

```
import cisco_analyzer
def main():
    config_filename = «/path/to/config/file»
    config = load_config(config_filename)
    check = cisco_analyzer.ConfigAnalyzer()
    dhcp = check.dhcp (config)
```

DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol - протокол динамічного налаштування вузла) - це мережевий протокол, що дозволяє комп'ютерам автоматично отримувати IP-адресу та інші параметри, необхідні для роботи в мережі. Даний протокол працює за моделлю «клієнт-сервер», де в якості клієнта виступає комп'ютер, запитуючи у DHCP-сервера конфігурації для роботи в мережі. Для автоматичної конфігурації комп'ютер - клієнт на етапі конфігурації мережевого пристрою звертається до так званого сервера DHCP і отримує від нього потрібні параметри. Мережевий адміністратор може задати діапазон адрес, що розподіляються сервером серед комп'ютерів. Це дозволяє уникнути ручного налаштування комп'ютерів мережі і зменшує кількість помилок.

## ВИСНОВКИ

1. На початку дослідження розглянуто теоретичні засади функціонування наземних супутникових та безпілотних телекомунікацій. Окремо проаналізовано підходи до трактування сутності поняття «телекомунікації», перелічено їх різновиди та дано їх головне призначення.

2. Зокрема наведено трактування досліджуваного поняття такими науковцями, як Абдуллазаде Ф. З., Жураковський Б. Ю., Трояновська Т. І. Загальне поняття «телекомунікації» базується на уявленні про технічні засоби, що дозволяють організувати зв'язок між двома і більше віддаленими об'єктами. Сучасні телекомунікаційні мережі є досить високоорганізованою частиною інфраструктури сучасного суспільства. Об'єктами телекомунікаційної мережі можуть виступати як термінальні пристрої користувачів, кінцеві системи мережі й окремі мережі. Кінцем, інтерфейсною точкою, телекомунікаційної мережі є або мережевий інтерфейс або міжмережевий інтерфейс.

3. Перелічено особливості телекомунікаційних рішень для наземних та безпілотних апаратів і сказано, що комунікації БПЛА відбуваються в залежності від відстані та інших параметрів через Wi-Fi, радіозв'язок чи супутниковий зв'язок. Проведено обґрунтування потреби в інноваційних рішеннях в умовах активного використання БПЛА. Констатовано, що одна з ключових відмінностей між сучасними мережами та майбутніми мережами полягає в тому, що останні будуть базуватися на абсолютно нових технологіях, як апаратних, так і програмних. Очікується, що в 2030-х роках з'явиться ще кілька нових ініціатив, таких як мобільні технології 5G та/або шостого покоління (6G).

4. Детально розглянуто завдання конвергенції наземного та повітряного бездротового зв'язку. Проаналізовано такі методи конвергенції, як Telecommunications Management Network – TMN, Telecommunications Information Networking Architecture- TINA, Next Generation Network – NGN та Multiprotocol Label Switching - MPLS. Досліджено основні вимоги до архітектури телекомунікаційних рішень в залежності від методу конвергенції.



5. В практичній частині дослідження проведено порівняльний аналіз застосування методів конвергенції наземних супутникових та безпілотних телекомунікаційних рішень. Наголошено на існуючих перевагах та недоліках досліджуваних методів.

6. Шляхом програмної реалізації на мові C++ зроблено спробу застосування отриманих результатів для вдосконалення бездротового зв'язку і управління БПЛА. Проведено візуалізацію результатів оцінки трафіку вдосконалюваної комп'ютерної мережі для здійснення обміну даними під час керування БПЛА оператором, що складається із 20 000 точок з допомогою програмного коду на мові C++. Приведемо приклад використання Cisco AI Network Analytics для пошуку та усунення неполадок в мережі бездротового зв'язку.