

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК ТА ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри

\_\_\_\_\_ Ігор ЖУКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 123 «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

**Тема:** Топологія захищеної від радіовипромінювання локальної комп'ютерної мережі наземного сегменту системи безпілотних авіаційних апаратів

Виконавець: \_\_\_\_\_ Олексій ПІДГАЙНИЙ

Керівник: \_\_\_\_\_ Микола ПЕЧУРІН

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Володимир ДРОВОВОЗОВ

Засвідчую, що у кваліфікаційній роботі  
немає запозичень із праць інших авторів  
без відповідних посилань

Студент: \_\_\_\_\_ Олексій ПІДГАЙНИЙ

Київ 2023

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних наук та технологій

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Напрямок (спеціальність) 123 "Комп'ютерна інженерія"

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ігор ЖУКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## **ЗАВДАННЯ на виконання кваліфікаційної роботи**

Підгайного Олексія Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема роботи: Топологія захищеної від радіовипромінювання локальної комп'ютерної мережі наземного сегменту системи безпілотних авіаційних апаратів затверджена наказом ректора від «29» серпня 2023р. №1521/ст;

2. Термін виконання роботи: з 02.10.2023 до 31.12.2023;

3. Вихідні дані до роботи: 1. Тип мережі – захищена; 2. Тип випромінювання – радіовипромінювання; 3. Клас комп. мережі – локальна; 4. Сегмент бач - наземний

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці): Перелік умовних позначень, скорочень, термінів; Вступ; Розділ 1 Системний аналіз захищених від радіовипромінювання комп'ютерних мереж; Розділ 2 Оцінка базових топологій; Розділ 3 Розробка інструментарію дослідження; Розділ 4 Створення інтерфейсу користувача; Висновки; Список бібліографічних посилань використаних джерел.

5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: презентація

## 6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Узгодження технічного завдання	02.10.2023	
2	Підбір та опрацювання теоретичного матеріалу	02.10.2023 – 10.10.2023	
3	Системний аналіз захищених від радіовипромінювання комп'ютерних мереж	10.10.2023 – 20.10.2023	
4	Визначення критеріїв захищеності від радіовипромінювання	20.10.2023 – 22.10.2023	
5	Проведення експерименту та аналіз результатів топологій оптимізації мережі	22.10.2023 – 24.10.2023	
6	Реалізація алгоритму Борувки для оптимізації мережі	24.10.2023 – 30.10.2023	
7	Дослідження систем координат	30.10.2023 – 03.11.2023	
8	Запровадження покращень до алгоритму Борувки для використання у сфері наземного фегменту системи БАК	03.11.2023 – 26.11.2023	
9	Створення інтерфейсу користувача, застосовуючого покращений алгоритм	26.11.2023 – 21.12.2023	
10	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	21.12.23 – 31.12.2023	
11	Подання матеріалів роботи на кафедру	22.12.23 – 31.12.2023	

7. Дата отримання завдання «02» жовтня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Микола ПЕЧУРІН  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Олексій ПІДГАЙНИЙ  
(підпис студента)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи “Топологія захищеної від радіовипромінювання локальної комп’ютерної мережі наземного сегменту системи безпілотних авіаційних апаратів”: 93 с., 27 рис., 7 табл., 31 літературне джерело, 2 додатки.

КОМП’ЮТЕРНА МЕРЕЖА, РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ, АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ, АЛГОРИТМ БОРУВКИ, СИСТЕМИ КООРДИНАТ, БПЛА, РАДІУС ДІЇ АНТЕН

**Мета роботи** – оптимізація топології локальної мережі для наземних систем БПЛА з урахуванням мінімізації довжини кабелів при забезпеченні надійного зв’язку та ефективного обміну даними.

**Об’єкт дослідження** – локальна комп’ютерна мережа.

**Предмет дослідження** – модель топології захищеної від радіовипромінювання локальної комп’ютерної мережі наземного сегменту системи безпілотних авіаційних апаратів.

**Результати:** розроблений алгоритм мінімізує радіовипромінювання в локальних мережах наземних БС БАК, а створений інтерфейс користувача спрощує процес встановлення оптимальних з’єднань між базовими станціями, значно скорочуючи час побудови мережі. Крім того, він допомагає приймати рішення, візуально представляючи радіус дії базових станцій та визначаючи потенційні вузькі місця мережі.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у оптимізації мережі наземних станцій БПЛА за використанням реальних координат БС із використанням алгоритму, що, зменшуючи довжину кабелів, підвищує ефективність використання ресурсів і збільшує радіозахищеність мережі.

**Програмні засоби**, задіяні в спроектованому об’єкті: *Python*.

**Прогнозні припущення про подальший розвиток:** поліпшення розрахунків дії антен за допомогою висот та апроксимації місцевості, а також підключення додатку до реальних систем для оновлення в режимі реального часу.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНИХ ВІД РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ.....	13
1.1. Проблема захисту локальних комп'ютерних мереж .....	13
1.1.1. Вплив природного середовища .....	14
1.1.2. Вплив людини .....	16
1.2. Критерії ступеня захищеності від радіовипромінювання топологій локальних комп'ютерних мереж.....	18
1.3. Джерела електромагнітного випромінювання .....	24
1.4. Особливості локальних мереж наземних базових станцій БАК.....	27
Висновки за розділом.....	32
РОЗДІЛ 2 ОЦІНКА БАЗОВИХ ТОПОЛОГІЙ .....	35
2.1. Порівняльний аналіз базових топологій .....	35
2.1.1. Постановка експерименту.....	36
2.1.2. З'єднання .....	36
2.1.3. Вимірювання довжини кабелю.....	38
2.1.4. Аналіз надійності .....	39
2.1.5. Аналіз затримок .....	39
2.2. Методи оптимізації прокладання кабелів .....	40
2.2.1. Алгоритм Борувки .....	41
2.2.2. Алгоритм Крускала.....	43
2.2.3. Алгоритм Прима .....	45
2.2.4. Результати .....	47
Висновки за розділом.....	48
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	50

3.1. Реалізація обраного алгоритму оптимізації.....	50
3.2. Аналіз початкової оптимізації.....	54
3.2.1. Вимірювання довжини кабелю.....	54
3.2.2. Аналіз надійності.....	55
3.2.3. Аналіз затримок.....	56
3.2.4. Результати.....	57
3.3. Покращення алгоритму знаходження мінімальних дерев.....	58
3.4. Робота з координатами для розрахунку відстаней.....	62
Висновки за розділом.....	67
<b>РОЗДІЛ 4 СТВОРЕННЯ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА.....</b>	<b>70</b>
4.1. Вибір технологій для візуалізації даних.....	70
4.2. Розрахунок радіусу дії антен.....	74
4.3. Побудова інтерфейсу користувача.....	78
Висновки за розділом.....	86
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>88</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>92</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>95</b>
Додаток А.....	95
Додаток Б.....	98

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

<i>API</i>	–	<i>Application Programming Interface</i>
<i>EIRP</i>	–	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
<i>FSPL</i>	–	<i>Free-space path loss</i>
<i>GCS</i>	–	<i>Geographic coordinate system</i>
<i>IEEE</i>	–	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>MST</i>	–	<i>Minimum Spanning Tree</i>
<i>OSI</i>	–	<i>The Open Systems Interconnection model</i>
<i>STP</i>	–	<i>Spanning Tree Protocol</i>
БАК	–	Безпілотний Авіаційний Комплекс
БС	–	Базова станція
БПЛА	–	Безпілотний літальний апарат
ЕМІ	–	Електромагнітний імпульс
ЛОМ	–	Локальна обчислювальна мережа

## ВСТУП

**Метою цієї роботи** є оптимізація топології локальної мережі для наземних систем БПЛА з урахуванням мінімізації довжини кабелів при забезпеченні надійного зв'язку та ефективного обміну даними.

Ми перебуваємо в умовах, де радіоелектронна боротьба визначає ключовий аспект бойового простору. Сучасні супротивники активно та цілеспрямовано використовують електромагнітні випромінювання з метою переривання або виведення з ладу військової техніки. У таких обставинах важливе впровадження ефективних заходів екранування електромагнітної інтерференції (ЕМІ), щоб забезпечити зниження рівня випромінювання та підвищити стійкість систем до негативного впливу. Ефективне екранування є стратегічно важливим елементом, спрямованим на збереження функціональності та надійності військових технічних систем в умовах активної електронної боротьби.

Втім, завжди найкращим стратегічним рішенням у контексті електромагнітного захисту є підхід "не смітити там, де живемо". Замість маскування випромінювання важливо активно протидіяти створенню зайвого шуму та непотрібного електромагнітного фону. Це передбачає застосування технологій та методів, спрямованих на ефективний контроль та обмеження власного випромінювання електронних систем. Такий підхід сприяє збереженню ефективності системи, зниженню її вразливості до радіоелектронної протидії та вдосконаленню загальної стійкості до електромагнітних завад.

У зв'язу із цим, розробка алгоритму оптимізації топології локальної мережі для наземних систем БПЛА з урахуванням мінімізації довжини кабелів є актуальною темою. Для досягнення поставленої мети визначено **наступні завдання**:

1. Системний аналіз захищених від радіовипромінювання комп'ютерних мереж, а саме: провести аналіз системи безпеки мережі наземних станцій БПЛА з урахуванням можливих загроз радіовипромінювання; розглянути можливі заходи та технології для захисту мережі від радіовипромінювання.



2. Аналіз обмежень і недоліків базового алгоритму, а саме: провести детальний аналіз базового алгоритму, виявивши обмеження та недоліки, що потребують вирішення; провести огляд літератури і підходів, що можуть бути корисними для покращення алгоритму.

3. Розширення алгоритму з урахуванням висоти станцій, а саме: розробити модифікацію алгоритму, яка враховуватиме висоту базових станцій, що дозволить покращити точність оптимізації мережі.

4. Розробка візуального інтерфейсу, а саме: розробити простий візуальний інтерфейс для користувача, який дозволить вводити параметри мережі і візуалізувати оптимізовану мережу.

5. Розробка інструментарію дослідження, а саме: розробити інструментарій для проведення досліджень та тестування алгоритму, включаючи відповідне програмне забезпечення та обладнання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у оптимізації мережі наземних станцій БПЛА за використанням реальних координат БС із використанням алгоритму, що, зменшуючи довжину кабелів, підвищує ефективність використання ресурсів і збільшує радіозахищенність мережі.

**Практичне значення роботи** полягає в його впливі на оптимізацію мереж наземних станцій БПЛА. Використовуючи оновлений алгоритм Борувки, робота досягає відчутних результатів з реальними наслідками. Мінімізація довжини кабелів є ключовим аспектом, що призводить до зменшення використання ресурсів, покращення цілісності сигналу та економічно ефективного розгортання інфраструктури - ключових аспектів в операціях з БПЛА. Оптимізована топологія мережі покращує зв'язок і надійність. Це життєво важливо для місій БПЛА, забезпечуючи безперебійний зв'язок, зменшуючи перешкоди сигналу і підвищуючи швидкість передачі даних.

Графічні зображення, створені в рамках роботи, слугують інтуїтивно зрозумілими інструментами для прийняття рішень. Військовослужбовці та мережеві адміністратори можуть використовувати ці візуалізації для оцінки оптимізованої мережі, визначення критичних вузлів та прийняття обґрунтованих рішень щодо

управління мережею.

Масштабованість алгоритму особливо корисна для великих мереж наземних станцій БПЛА. Алгоритм гарантує, що мережа залишається добре організованою та оптимізованою в міру того, як змінюються експлуатаційні вимоги.

Зрештою, оптимізована мережа сприяє підвищенню операційної ефективності місій БПЛА, впливаючи на виконання завдань від спостереження до розвідки. Результати роботи спрямовані на вирішення проблем, з якими стикаються мережі наземних станцій БПЛА, пропонуючи конкретні рішення для оптимізації мережі і підвищення операційної ефективності.

У роботі використовуються наступні **методи дослідження**: аналіз, індукція, порівняння, експеримент, абстрагування.

#### **Підхід до вирішення завдання:**

1. Дослідити різні мережеві топології та їх характеристики з точки зору довжини кабелів та надійності.

2. Розробити алгоритм оптимізації, який враховує фізичне розташування та близькість компонентів для мінімізації довжини кабелів у вибраній топології мережі. Цей алгоритм повинен бути спрямований на пошук найбільш ефективних шляхів прокладки кабелів, що відповідають вимогам надійності та продуктивності.

3. Оцінити продуктивність оптимізованої топології мережі з точки зору швидкості передачі даних, затримок та ефективності мережі. Порівняти результати з початковими вимогами наземної системи БПЛА.

4. Перевірити оптимізовану топологію мережі за допомогою симуляцій або практичної реалізації, щоб оцінити її ефективність в мінімізації прокладки кабелів при дотриманні експлуатаційних вимог наземної системи БПЛА.

Першим кроком для реалізації проектування топологій захищених від радіовипромінювання локальних комп'ютерних мереж є встановлення вимог до мережі та визначення її основних цілей.

Локальні мережі для наземних систем БАК відіграють вирішальну роль у підтримці роботи, контролю та обміну даними між наземними компонентами, що беруть участь в операціях БАК. Ці мережі забезпечують зв'язок між наземними

пунктами управління, системами планування місій, операторами корисного навантаження, телеметричними системами та іншими елементами наземної інфраструктури. Одночасно зростає якість та складність електронного обладнання, а загроза радіоелектронної протидії, що включає в себе глушіння радарів, обман та можливі руйнівні атаки електромагнітним імпульсом, набуває обраної форми. Ці обставини обумовлюють необхідність посилення захисту від електромагнітних та радіочастотних завад, що на сьогодні представляє виклик для фахівців у галузі аерокосмічного та оборонного інжинірингу. Ці технічні вдосконалення важливі для забезпечення безпеки та успішного виконання місій.

Метою цього дослідження є вирішення проблеми оптимізації топології локальної мережі для наземних систем БПЛА з урахуванням мінімізації довжини кабелів при збереженні надійного зв'язку та ефективного обміну даними. Зменшення довжини кабелів дозволяє мінімізувати загальну складність, вартість та вразливість до збоїв мережі, що призводить до підвищення продуктивності та ефективності роботи системи.

Для досягнення цієї мети в даному дослідженні пропонується алгоритм оптимізації, який враховує фізичне розташування і близькість компонентів, спрямований на пошук найбільш ефективних шляхів прокладки кабелів в рамках обраної топології мережі. Алгоритм враховує системні обмеження, такі як надійність, масштабованість та безпека мережі, мінімізуючи при цьому довжину кабелів. Робота спрямована на врахування висоти базових станцій, що дозволить покращити точність оптимізації мережі. Також розглядається можливість додаткових покращень, таких як створення простого візуального інтерфейсу. Ця робота є кроком вперед у розв'язанні складної проблеми оптимізації топології мережі для наземних систем БПЛА, і я сподіваюсь, що результати цього дослідження допоможуть покращити якість та надійність таких систем у майбутньому.

**Подальший розвиток** полягає в розвитку розрахунку дальності дії антен, використовуючи дані висоти та апроксимації по місцевості (наприклад, місто, поле, і так далі). Удосконалені розрахунки не лише сприятимуть більш точному прогнозуванню покриття, але й полегшать стратегічне планування, пристосоване до

конкретних операційних умов.

Більше того, підключення розробленого додатку до реальних систем для оновлення в режимі реального часу додасть динамічного виміру управлінню мережею. Це може передбачати інтеграцію додатку з потоками даних в реальному часі, що дозволить військовослужбовцям отримувати безперервні оновлення про роботу антени на основі змін умов навколишнього середовища. Підключення в режимі реального часу підвищує актуальність роботи, гарантуючи, що мережа наземних станцій швидко адаптується до сценаріїв, що змінюються, посилюючи її ефективність у критично важливих для місії ситуаціях.

Цей комбінований підхід враховує складність реальних операцій з використанням БПЛА, де адаптивність до різних умов місцевості і здатність реагувати в режимі реального часу мають першорядне значення для успіху місії. Наслідки цих досягнень виходять за межі теоретичних міркувань, забезпечуючи практичний і оперативний інструмент для оптимізації мереж наземних станцій БПЛА в динамічних і складних ландшафтах.

# РОЗДІЛ 1

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНИХ ВІД РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

### 1.1. Проблема захисту локальних комп'ютерних мереж

З розвитком інформаційних технологій застосування комп'ютерних мереж стає все більш масштабним, і проблеми безпеки отримують більше уваги. У державних установах, школах і компаніях зберігаються конфіденційні дані, які обов'язково потрібно захистити. Комп'ютерні мережі мають різноманітність з'єднань, неоднорідно розподілені термінали і взаємодіють з різними мережами, що робить їх вразливими перед загрозами, такими як хакерські атаки та зловмисне програмне забезпечення. Тому забезпечення безпеки та конфіденційності мережевої інформації стає особливо актуальною темою.

Захист локальних комп'ютерних мереж, також відомих як *LAN* (рис. 1.1), має важливе значення для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних і ресурсів в організації.

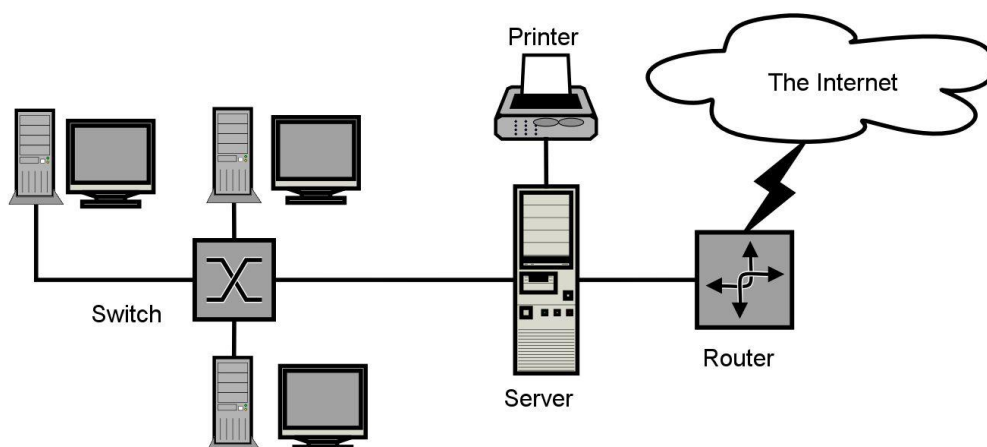


Рис. 1.1. Приклад локальної комп'ютерної мережі

Мережеві загрози можуть використовувати різні слабкі місця безпеки мережі, що може призвести до несанкціонованого доступу, розкриття інформації, виснаження ресурсів, крадіжки ресурсів або навіть їхнього знищення. Безпека мережі стикається

з загрозами, які походять з різних джерел і змінюються з часом. Ми виділяємо декілька видів загроз кібербезпеці:

1. Фізична загроза, включаючи крадіжки, шпигунство і помилки ідентифікації. Крадіжки комп'ютерів стали досить поширеними, особливо коли йдеться про комп'ютери з важливими даними, що може призвести до серйозних втрат.

2. Вразливості систем, включаючи небезпечні служби, конфігураційні помилки та ініціалізацію. Вразливості систем можуть стати легкою вхідною точкою для загроз безпеці мережі. Регулярні оновлення та встановлення системних патчів можуть допомогти запобігти таким вразливостям.

3. Загрози ідентифікації, включаючи недостатньо складені паролі, перехоплення паролів та атаки на алгоритми шифрування. Налаштування безпечних паролів має велике значення, оскільки вони забезпечують захист від несанкціонованого доступу.

4. Загрози кабельного підключення, такі як телефонні входи, самозванці та прослуховування. Процес прослуховування може відбуватися в мережевих кабелях, і в широкому масштабі це може відбуватися на кожному вузлі, що сприяє витоку конфіденційної інформації.

5. Шкідливе програмне забезпечення, таке як віруси, троянці, оновлення або завантаження. Зі зростанням залежності від комп'ютерних систем і мережі, комп'ютерні віруси стали серйозною загрозою. Тому важливо вживати заходи для запобігання інфікуванню пристроїв в мережі.

Але як ми можемо помітити, все це стосується локальних мереж в цілому. Для локальних комп'ютерних мереж у контексті наземного сегменту БАК всі ці загрози все ще реальні (навіть більше, ніж для простої мережі організації), але при цьому додаються і інші небезпеки.

Загалом, всі ці ризики можна поділити на дві великі категорії в залежності від їх джерела – вплив природного середовища та вплив людини.

### **1.1.1. Вплив природного середовища**

Дані стають для нас надзвичайно цінними, і вони є найціннішою частиною операцій з великими обсягами даних. У природному середовищі існує низка

непередбачуваних факторів. Природні катаклізми, вплив різних засобів комп'ютерної техніки, відмови обладнання через екстремальні температурні умови, проблеми з апаратним забезпеченням через вологий клімат і так далі можуть призвести до втрати вартості та цінності даних [1]. Природне середовище може суттєво впливати на безпеку та захист локальної мережі, створюючи унікальні виклики, які організації повинні враховувати у своїх загальних стратегіях кібербезпеки. Хоча кібербезпека часто зосереджена на технологічних і людських факторах, не можна нехтувати впливом стихійних лих і екологічних подій:

– Вразливість фізичної інфраструктури – стихійні лиха, такі як землетруси, повені, урагани або лісові пожежі, можуть пошкодити фізичну мережеву інфраструктуру. Центри обробки даних, мережеві концентратори та лінії зв'язку можуть постраждати безпосередньо, що призведе до перебоїв у підключенні та потенційної втрати даних.

– Проблеми з енергопостачанням – стихійні лиха можуть спричинити перебої в електропостачанні, що впливає на доступність і роботу локальних мереж. Системи резервного живлення, такі як генератори та джерела безперебійного живлення (ДБЖ), стають критично важливими для підтримання безперервності роботи мережі під час таких подій.

– Розташування центру обробки даних – географічне розташування центрів обробки даних і мережевого обладнання має вирішальне значення. У районах, схильних до стихійних лих, можуть знадобитися додаткові заходи, такі як стійке до стихійних лих будівництво та планування резервування, щоб забезпечити безперервну роботу локальних мереж.

– Втрата та відновлення даних – стихійні лиха можуть призвести до втрати даних через пошкодження пристроїв зберігання або інфраструктури. Впровадження надійних стратегій резервного копіювання та відновлення стає необхідним для захисту даних у разі погіршення стану навколишнього середовища.

– Телекомунікаційна інфраструктура – стихійні лиха можуть пошкодити телекомунікаційну інфраструктуру, впливаючи на канали зв'язку, важливі для локальних мереж. Резервування каналів зв'язку та співпраця з декількома

постачальниками послуг може зменшити ці ризики.

– Відмовостійкість і резервування – проектування мереж з урахуванням відмовостійкості та резервування допомагає забезпечити безперервну роботу навіть перед обличчям екологічних викликів. Це може включати розподілені центри обробки даних, системи резервного копіювання та резервні мережеві шляхи.

### **1.1.2. Вплив людини**

У сфері комп'ютерних інцидентів зловмисники часто використовують хакерські атаки. Хакерські атаки вже давно стали поширеними випадками порушення інформаційної безпеки і використання комп'ютерів для цього. У процесі комп'ютерної безпеки, якщо внутрішнє небезпечення комп'ютера не враховується при забезпеченні безпеки мережі, це може сильно позначитися на безпеці користувача.

Інтернет сам по собі характеризується відкритістю. Усі дані в Інтернеті є відкритими та загальнодоступними [2]. Багато мереж не мають надійного рівня захисту, тому вони вразливі перед комп'ютерними вірусами, які становлять загрозу мережевій безпеці.

У процесі використання мережі користувачами можливі неправильні дії або погані звички, які можуть призвести до проблем з безпекою мережі. Наприклад, користувачі, які не обережно ведуть себе в Інтернеті, можуть стати жертвами атак або рекомендується встановити оригінальне обладнання та ресурси. Комп'ютерні віруси зазвичай дуже витончено приховані та активуються лише при відповідних обставинах, розкриваючи важливу інформацію та завдаючи шкоду в той момент, коли вони є найшкідливішими. Крім того, комп'ютерні віруси можуть спричинити серйозну руйнівну дію, таку як форматування диску, втрата важливих даних, призупинення роботи комп'ютерної системи тощо.

Людський фактор є критично важливим і часто складним елементом у сфері безпеки та захисту локальної мережі. Людські дії, поведінка та рішення можуть як посилити, так і послабити безпеку мережі. Розуміння та врахування людського фактору має важливе значення для розробки комплексних стратегій захисту локальних мереж. Ось ключові аспекти того, як людський фактор впливає на безпеку та захист локальної мережі:



– Обізнаність і навчання користувачів – добре поінформовані та обізнані в питаннях безпеки користувачі є фундаментальним захистом від різних загроз. Навчальні програми, які розповідають користувачам про ризики кібербезпеки, фішинг та найкращі практики, роблять значний внесок у безпеку локальної мережі.

– Загрози соціальної інженерії – соціальна інженерія використовує людську психологію, щоб маніпулювати людьми, змушуючи їх розголошувати конфіденційну інформацію або вчиняти дії, які ставлять під загрозу безпеку. Розпізнавання та пом'якшення загроз соціальної інженерії має вирішальне значення для захисту локальної мережі.

– Практики автентифікації – людські звички, пов'язані зі створенням паролів та управлінням ними, впливають на надійність механізмів автентифікації. Заохочення використання надійних, унікальних паролів та впровадження багатофакторної автентифікації підвищує безпеку локальних мереж.

– Внутрішні загрози – внутрішні загрози можуть виникати від працівників зі зловмисними намірами або тих, хто несвідомо ставить під загрозу безпеку. Впровадження контролю доступу, моніторинг дій користувачів та розвиток культури довіри можуть зменшити внутрішні загрози.

– Поінформованість про фішинг – фішингові атаки часто націлені на людей за допомогою оманливих електронних листів або повідомлень. Навчання користувачів розпізнавати спроби фішингу та повідомляти про підозрілі повідомлення має вирішальне значення для запобігання несанкціонованому доступу.

– Практики безпеки пристроїв – людська поведінка, пов'язана з використанням пристроїв, наприклад, підключення до незахищених мереж або завантаження неперевіреного програмного забезпечення, може призвести до появи вразливостей. Популяризація безпечних практик використання пристроїв серед користувачів має важливе значення для захисту локальної мережі.

– Дотримання політики – дотримання людьми політики безпеки має вирішальне значення. Чіткі та застосовні політики щодо обробки даних, використання мережі та контролю доступу допомагають створити надійний фундамент для захисту локальної мережі.

– Реагування на інциденти – створення культури, в якій користувачі відчувають себе комфортно, повідомляючи про інциденти безпеки, має важливе значення. Оперативне повідомлення про підозрілі дії або потенційні порушення дозволяє швидко реагувати на інциденти та пом'якшувати їх наслідки.

– Практики контролю доступу – участь людини в наданні та управлінні дозволами на доступ може призвести до вразливостей. Впровадження принципу найменших привілеїв і регулярний перегляд доступу користувачів допомагає зменшити ризик несанкціонованого доступу.

– Проблеми використання власних пристроїв – використання персональних пристроїв для роботи створює проблеми з безпекою. Організаціям потрібна чітка політика щодо використання власних пристроїв, яка враховує вимоги безпеки, такі як шифрування пристроїв і безпечне з'єднання.

– Культурні аспекти – загальна організаційна культура впливає на індивідуальну поведінку. Формування культури, яка цінує кібербезпеку і надає їй пріоритет, підвищує ефективність заходів безпеки локальної мережі.

І тоді коли як на ризики, пов'язані із впливом людини, ми не можемо вплинути через чисто фізичну модель побудови ЛОМ, ми можемо зменшити потенційний вплив природного середовища. Однією з таких потенційних загроз є радіовипромінювання, яке важливо вивчити та зменшити його негативний вплив. У сучасних локальних мережах наземного сегмента БАК радіовипромінювання може бути як підступним, так і небезпечним явищем. Воно може створювати потенційні уразливості для системи, зробити базові станції більш помітними для ворога, тощо.

## **1.2. Критерії ступеня захищеності від радіовипромінювання топологій локальних комп'ютерних мереж**

У військовому контексті захист від електромагнітних завад відіграє вирішальну роль. Як підкреслює Хатчінсон [3], електронні пристрої випромінюють радіохвилі, і коли два пристрої не призначені для спільної роботи, це може призвести до проблем електромагнітної несумісності. Випромінювання одного пристрою може порушити

роботу або навіть призвести до виходу з ладу іншої частини обладнання. Ця проблема стає особливо серйозною, коли на кону життя або завдання військовослужбовців. Щоб вирішити ці проблеми і забезпечити безперебійну роботу, ефективне екранування електромагнітних завад стає обов'язковим для військових електронних систем.

"Коли ми говоримо про системи, що відповідають за безпеку і критично важливі для виконання місій, багато з них були розроблені деякий час тому, а зараз вони потрапляють в електромагнітне середовище або спектр, для якого вони не були розроблені, або де зараз присутні інші випромінювачі", - продовжує Хатчінсон. "Це може призвести до збоїв у роботі, втрати працездатності або повного виходу з ладу цих систем. Коли ми говоримо про втрату критично важливої для безпеки або місії системи, це означає, що хтось може загинути, обладнання може бути зруйноване або місія може бути провалена".

"Захист від електромагнітних завад завжди викликає занепокоєння, оскільки "більш електрифіковані" літаки і транспортні засоби містять потенційно шумні компоненти у вигляді численних і високовольтних двигунів з відповідними джерелами живлення", - каже Дж. Грант Лоутон, інженер-розробник військових дротів і кабелів у Військовому інституті ім. У. Л. Гора у Філадельфії. "В той же час ці компоненти розміщуються поруч з багатьма високошвидкісними кабелями передачі даних, які створюють додаткову загрозу перехресних наведень."

Оцінюючи ступінь захисту від радіовипромінювань для різних топологій локальних комп'ютерних мереж, необхідно враховувати кілька критеріїв, що забезпечують надійність і безпеку мережі. Ці критерії допомагають оцінити сприйнятливості мережі до радіочастотних перешкод і її здатність ефективно пом'якшувати такі перешкоди:

– Фізична безпека та екранування: фізична інфраструктура мережі, включаючи кабелі, сервери та екрануючі матеріали, відіграє важливу роль у захисті від радіочастотного випромінювання.

– Тип топології: різні топології мережі, такі як зірка, шина, кільце або сітка, мають різний ступінь сприйнятливості до перешкод.

– Тип і якість кабелю: тип і якість мережевих кабелів (наприклад, коаксіальний, вита пара, оптоволоконний) можуть впливати на їх сприйнятливість до радіочастотних перешкод. Високоякісні екрановані кабелі часто віддають перевагу в середовищах із високим РЧ-випромінюванням.

– Відстань і потужність сигналу: відстань між мережевими пристроями та потужність сигналів, що передаються, можуть впливати на вразливість мережі до радіочастотних перешкод.

Розглянемо перший критерій. Механізм екранування може бути поглинанням, відображенням або множинним внутрішнім відображенням, запобігачим проникненню випромінювання через екран. Для того, щоб матеріал мав хорошу екрануючу здатність, він повинен мати високу електропровідність, відносну діелектричну проникність, магнітну проникність та велику внутрішню поверхню. Серед різноманітних механізмів екранування основним механізмом є відображення.

Відображення є основним процесом екранування від електромагнітних перешкод. В першу чергу це спостерігається в матеріалах з високою провідністю. Матеріал повинен містити рухливі носії заряду, які взаємодіють з електромагнітними полями [4]. Однак висока провідність не є необхідною й достатньою умовою, оскільки важливіше хороше з'єднання на шляху провідності.

Іншим механізмом є поглинання, яке відбувається в матеріалах з електричними або магнітними диполями та кінцевою електропровідністю. Для цього використовуються матеріали з високою діелектричною проникністю і високою магнітною проникністю. Поглинання залежить від розмірів матеріалів, і ефективність екранування зростає зі збільшенням товщини [5].

Багаторазове внутрішнє відбиття є іншим механізмом, за допомогою якого відбувається екранування електромагнітних перешкод. Це відбиття, викликані різними поверхнями або інтерфейсами в екрані. Багаторазові внутрішні відбиття вимагають великої площі поверхні, отриманої в пористих або спіненних матеріалах. Цей механізм значущий лише для тонких плівок і пористих структур, тоді як він незначний для товстих матеріалів, де товщина перевищує глибину скін-сфери, а глибина скін-сфери відноситься до відстані, необхідної для зменшення хвилі до  $1/e$

або 37% [4] (рис. 1.2).

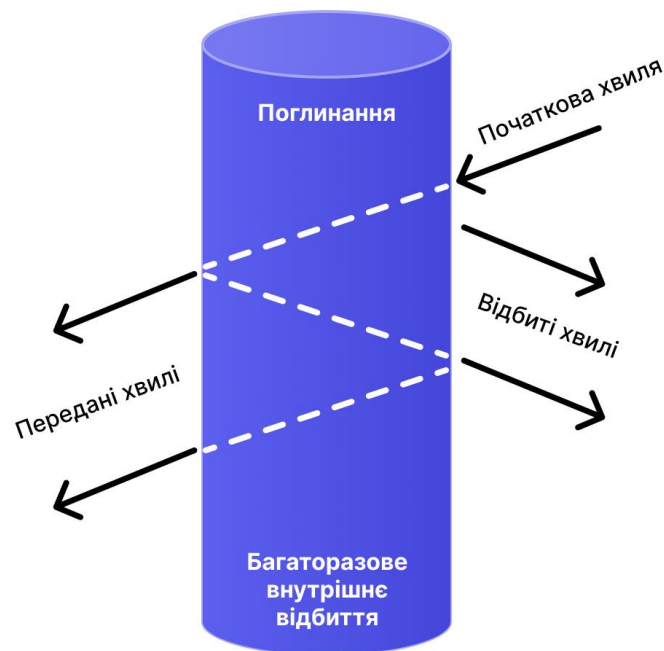


Рис. 1.2. Процес багаторазового внутрішнього відбиття

Втрата потужності через екранування називається ефективністю екранування, де втрата потужності вказує на втрату через взаємодію падаючого випромінювання з екрануючим матеріалом. Втрати як на поглинання, так і на відбиття сприяють цій втраті потужності, де втрата через поглинання називається втратою поглинання, а втрата через відображення є втратою відбиття. Таким чином, ефективність екранування описується як загальна сума трьох вищезазначених процесів [4] і визначається наступної математичною формулою:

$$SE_{total} = SE_R + SE_A + SE_M$$

де  $SE_{total}$  - загальна ефективність екранування;

$SE_R$  - ефективність екранування через відбиття;

$SE_A$  - ефективність екранування через поглинання;

$SE_M$  - ефективність екранування через множинні внутрішні відбиття.

Його також можна виразити як логарифмічну функцію напруженості електричного, магнітного та плоскохвильового полів:

$$SE = 20 \log \left( \frac{E_0}{E_1} \right),$$

$$SE = 20 \log \left( \frac{H_0}{H_1} \right),$$

$$SE = 20 \log \left( \frac{F_0}{F_1} \right)$$

де  $E_0$  – інтенсивність електричного поля падаючого випромінювання;

$H_0$  – інтенсивність магнітного поля падаючого випромінювання;

$F_0$  – інтенсивність плоскої хвилі падаючого випромінювання;

$E_1$  – інтенсивність електричного поля пропущеного випромінювання;

$H_1$  – інтенсивність магнітного поля пропущеного випромінювання;

$F_1$  – інтенсивність плоскої хвилі пропущеного випромінювання.

Ефективність екранування матеріалу відображає його якість екранування.

Ідеальним матеріалом для екранування електромагнітних перешкод є той, який значно зменшує передачу електромагнітних хвиль, що проходять через нього. Домінування втрат на відбиття або поглинання залежить від характеристик матеріалу, а також від падаючого випромінювання. Щоб матеріал виступав у ролі щита, необхідно задовольняти певним критеріям:

– Провідність. Першим і головним параметром захисту від електромагнітних перешкод є електропровідність. Навіть якщо можливе поглинання електромагнітних перешкод за допомогою поглиначів електромагнітних хвиль, достатня ефективність екранування може бути досягнута лише з електропровідним матеріалом.

– Загальний  $SE$  в термінах провідності ( $\sigma$ ), діелектричної проникності ( $\epsilon_0$ ) і проникності ( $\mu r$ ) можна виразити за допомогою наступної математичної залежності:

$$SE_{total} = 20d \left( \frac{\sqrt{\mu r \omega \sigma}}{\sqrt{2}} \right) \left( \log(e) + 10 \log \left( \frac{\sigma}{16 \mu r \omega \epsilon_0} \right) \right)$$

де  $d$  – товщина зразка;

$\sigma$  – електропровідність;

$\mu r$  – відносна магнітна проникність;

$\epsilon 0$  – діелектрична проникність вакууму;

$\omega$  – кутова частота.

– Частота падаючої хвилі. Збільшення частоти зменшує втрати на відбиття, тоді як збільшує втрати на поглинання.

– Діелектрична поляризованість і проникність. Відповідно до принципу Максвелла-Вагнера-Сілларса, екранованість збільшується зі збільшенням діелектричної поляризованості матеріалу. Це пов'язано з невідповідністю провідності між наповнювачем і матрицею [6].

– Товщина екрана. Збільшення товщини екрана сприяє збільшенню втрат на поглинання, а втрати на відбиття залишаються незмінними [5].

– Електричне підключення. Електричне з'єднання покращує екранування завдяки безперервним лініям електричного поля, сформованим у матеріалі [7].

Всі ці параметри важливі при визначенні найкращого варіанту захисту від радіовипромінювання, але вони приносять із собою додаткові витрати на захищені кабелі. Крім цього, за словами Чехова - “Чисто не там, де прибирають, а там, де не сміять.”, що підходить і для нашої ситуації. Ми можемо боротись із електровипромінюванням, але найкращим рішенням завжди буде максимально його зменшити ще перед використанням методів екранування. Таким чином, ми залишаємось із наступним списком критеріїв, на які необхідно звернути увагу:

– Тип топології: різні топології мережі, такі як зірка, шина, кільце або сітка, мають різний ступінь сприйнятливості до перешкод.

– Тип і якість кабелю: тип і якість мережевих кабелів (наприклад, коаксіальний, вита пара, оптоволоконний) можуть впливати на їх сприйнятливість до радіочастотних перешкод.

– Відстань і потужність сигналу: відстань між мережевими пристроями та потужність сигналів, що передаються, можуть впливати на вразливість мережі до радіочастотних перешкод.

Крім цього також можна додати таку змінну, як надійність мережі – тобто здатність дротової мережі в наземних станціях БПЛА підтримувати стабільний і

безперервний зв'язок, навіть за наявності збоїв або перебоїв.

"Ми перебуваємо в середовищі, де радіоелектронна боротьба є ключовим компонентом бойового простору. Є й інші супротивники, які спеціально використовують електромагнітні випромінювання, щоб переривати або виводити з ладу військову техніку. У цьому випадку екранування *EMI/RFI* важливе для того, щоб мати можливість заземлити ці випромінювання - створити навколо обладнання площину заземлення, де обладнання всередині буде захищене від цих шкідливих випромінювань", - каже Хатчінсон.

### **1.3. Джерела електромагнітного випромінювання**

Електромагнітні хвилі являють собою передачу коливань електричного і магнітного полів з однієї точки простору в іншу, що генеруються електричними зарядами і струмами [8]. Взаємозв'язок сусідніх областей в електромагнітному полі виникає тому, що будь-яка зміна електричного поля індукує магнітне поле, і навпаки, зміни в магнітному полі генерують електричне поле. Цей взаємний зв'язок сприяє поширенню електромагнітних хвиль. Хоча наявність твердого, рідкого або газоподібного середовища може суттєво впливати на поширення хвиль, варто зазначити, що електромагнітні хвилі можуть проходити крізь вакуум. Джерелом електричного поля є електрично заряджені тіла, а провідники з електричним струмом створюють навколишнє магнітне поле. Коли електричні заряди статичні, електричне поле, яке вони створюють, залишається постійним. У разі рівномірного руху, в результаті якого виникає постійний електричний струм, створюється незмінне магнітне поле, що перешкоджає виникненню електромагнітних хвиль.

Однак, коли електричні заряди зазнають нерівномірного руху, зокрема, коливання, електричне і магнітне поля зазнають часових змін. Ці зміни передаються від однієї точки до іншої, даючи початок поширенню електромагнітних хвиль в усіх напрямках. Важливою передумовою для прояву електромагнітних хвиль є досить висока частота електричних коливань. Ця складна взаємодія динамічних електричних і магнітних полів, що підживлюється



коливаннями електричних зарядів, забезпечує основу для існування і поширення електромагнітних хвиль.

Зростаюча поширеність забруднення електромагнітним (ЕМ) випромінюванням, спричиненим насамперед електростатичними розрядами, викликає все більше занепокоєння з далекосяжними наслідками. Цей сплеск електромагнітного випромінювання створює ризики в різних сферах, призводячи до негативного впливу на електронне обладнання, здоров'я людей, військову безпеку, цивільне комунальне господарство, вміст поживних речовин в овочах і стабільність біотичних систем, включаючи ріст рослин.

Високопродуктивні електронні пристрої, покликані підвищити якість нашого життя, виділяються як помітний внесок у цей сплеск електромагнітного випромінювання. Від бездротових комп'ютерів, мобільних телефонів і розумних гаджетів до телевізорів, мікрохвильових печей, радіоприймачів, навігаційних систем і радіолокаційного обладнання - ці пристрої відіграють значну роль у випромінюванні радіації. Крім того, допоміжні компоненти, такі як силові кабелі, повітряні лінії, супутники та автомобільні системи також вносять свій внесок у генерацію електромагнітного випромінювання.

У контексті військових операцій, а особливо базових станцій БПЛА, наслідки забруднення електромагнітним випромінюванням є особливо актуальними. Базові станції БПЛА, оснащені складними електронними системами зв'язку, навігації та управління, є не тільки потенційними джерелами, але й вразливими об'єктами ЕМ випромінювання. Вплив радіаційного забруднення на базові станції БПЛА може порушити роботу мереж зв'язку, скомпрометувати навігаційне обладнання та підірвати загальну операційну ефективність. Це підкреслює критичну важливість розуміння, оцінки і зменшення впливу електромагнітного випромінювання при плануванні і розгортанні базових станцій БПЛА, забезпечуючи надійність і безпеку військових операцій.

Більше того, чіткі електронні хвилі, що випромінюються базовими станціями БПЛА, роблять їх вразливими до виявлення. Легкість ідентифікації цих станцій в електромагнітному спектрі створює додаткові проблеми, оскільки потенційні

супротивники можуть використати цю інформацію для компрометації військових комунікацій і операцій. З розвитком технологій стає необхідною розробка контрзаходів для захисту базових станцій БПЛА як від ненавмисних, так і від навмисних електромагнітних завад, що посилює стійкість і безпеку військової інфраструктури.

У таблиці 1.1 представлені основні джерела випромінювання електромагнітних хвиль.

Таблиця 1.1

Джерела та застосування випромінювання різних частот

Частота (Гц)	Джерело	Застосування
50	Розподільні щити, лінії електропередач	Передача енергії
$135.6 \times 10^3$	Індукційні нагрівальні печі	Металургійний процес
$174 - 230 \times 10^6$	Цифрове радіо	Радіостанції
$120 \times 10^3 - 868 \times 10^6$	Електронна протиугінна система	Ідентифікація та захист об'єктів від крадіжок у роздрібній торгівлі
$420 - 450 \times 10^6$	CDMA в мобільному зв'язку	У мережах базових станцій мобільного зв'язку
$800 - 2600 \times 10^6$	У мобільних телефонах - LTE, GSM та UMTS у мережах базових станцій мобільного зв'язку	Комунікація
$2400 \times 10^6$	WiFi	Передача даних
$2450 \times 10^6$	Мікрохвильова піч	Гастрономічне застосування

Порушення, спричинені електромагнітним випромінюванням, можуть призвести до неправильного функціонування пристроїв, що спричиняє збої в роботі електронного обладнання або потенційну втрату даних з цих пристроїв [9].

#### **1.4. Особливості локальних мереж наземних базових станцій БАК**

Наземні станції управління для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відіграють ключову роль як наземні системи зв'язку і управління, полегшуючи безпосереднє пілотування і зв'язок між операторами і БПЛА. Ці системи дозволяють пілотувати БПЛА, передавати відео і дані в режимі реального часу і є важливим аспектом еволюції ландшафту збору даних з повітря на великих відстанях. Оскільки БПЛА роблять все більший внесок у різні галузі завдяки аерофото- і відеозйомці, важливість розвитку наземних систем управління в тандемі з удосконаленням БПЛА набуває особливого значення.

Наземні станції керування БПЛА - це складні системи, що включають в себе антену, радіо, мобільний комп'ютер і джойстик керування. Зазвичай мобільні, ці станції розміщуються в транспортних кейсах або оснащені рішеннями для швидкого встановлення, такими як міцні триноги. Зв'язок з БПЛА встановлюється за допомогою всеспрямованого або спрямованого бездротового зв'язку, що зазвичай працює в неліцензованих діапазонах спектра. Цей бездротовий зв'язок надає операторам інформацію в реальному часі про місцезнаходження і характеристики БПЛА, покращуючи контроль і оперативність.

Наземні станції БПЛА надають віддаленим пілотам віртуальну кабінку, забезпечують широкосмуговий зв'язок через антену стеження, що дозволяє здійснювати моніторинг польотних даних в режимі реального часу і коригувати траєкторію польоту. Крім того, ці станції забезпечують потокове відео в реальному часі, надаючи операторам можливість бачити перспективу польоту БПЛА з висоти пташиного польоту. Ця функція особливо важлива в оборонній та правоохоронній сферах, де відеомоніторинг в реальному часі покращує прийняття рішень під час розвідувальних та пошуково-рятувальних місій.

Існують різні типи наземних станцій управління, які можна використовувати як для настільних комп'ютерів, так і для смартфонів, що відповідають різним типам безпілотників та уподобанням користувачів. Готові до польоту дрони, які зазвичай використовують цивільні особи, часто використовують інтуїтивно зрозумілі

платформи *GCS* на смартфонах і планшетах. На противагу цьому, дрони, що збираються своїми руками, і комплектні дрони отримують вигоду від більш комплексних настільних додатків *GCS*, які надають доступ до інструментів конфігурації і аналітики. Системи зв'язку цивільних БПЛА зазвичай функціонують у діапазонах частот 2,4 ГГц і 5,8 ГГц. Ці системи використовують двочастотний підхід: одна частота забезпечує дистанційне керування літальним апаратом з землі, тоді як інша частота призначена для передачі даних або ретрансляції відео з видом від першої особи (*FPV*). Використовуючи надійні та надійні лінії зв'язку, цивільні БПЛА без особливих зусиль передають повітряні зображення і дані наземним одержувачам, забезпечуючи при цьому безперервність польотів.

Тим не менш, в оборонних цілях застосовуються різні типи дронів. Оборонні дрони помітно відрізняються від цивільних БПЛА, часто виконуючи тривалі місії або потребуючи наступальних можливостей поряд із забезпеченням повітряної розвідки поля бою. Значне занепокоєння при використанні безпілотників в оборонних цілях викликає перспектива глушіння сигналів. Глушіння сигналу розриває зв'язок між віддаленим пілотом і оперативною базою, перешкоджаючи доступу до візуальної інформації з безпілотника. Незважаючи на потенційну серйозність такого сценарію, більшість оборонних дронів спроектовані таким чином, щоб автономно повертатися на базу в разі зникнення зв'язку.

Більші військові БПЛА, такі як *Bayraktar TB2*, мають щось схоже на "віртуальну кабіну" (рис. 1.3). Пілот або оператор датчика сидить перед кількома екранами, на яких відображається вид з БПЛА, мапа і прилади літака. Керування здійснюється за допомогою звичайного джойстика і педалі газу в авіаційному стилі, можливо, з функцією *Hands on Throttle and Stick (HOTAS)* (Руки на педалі газу і стикуванні).

Усвідомлюючи вразливість до глушіння сигналу, оборонні оператори розробили альтернативне рішення - інтеграцію резервних бортових навігаційних систем, які працюють незалежно від *GPS*. Завдяки зменшенню залежності від даних *GPS*, глушіння сигналу стає рідкісним явищем, що дозволяє оборонним дронам успішно виконувати свої місії і безпечно повертатися на базу.



Рис. 1.3. Внутрішня частина базової станції *Bayraktar TB2*

Наземні станції управління стають невід'ємними компонентами для успішного пілотування дронів, пропонуючи простоту в експлуатації і розширені можливості відеомоніторингу. Вони позиціонують БПЛА як нову межу для повітряних місій, обслуговуючи різноманітне коло операторів, від аматорів і власників бізнесу до правоохоронних і оборонних відомств.

Основна антена дистанційного керування наземних станцій БПЛА слугує основним каналом зв'язку, чутливим до перешкод, які можуть порушити основний канал передачі даних дистанційного керування. Ці перешкоди впливають на різні підсистеми, погіршуючи продуктивність і потенційно спричиняючи втрату керування. У БПЛА піддаються впливу електромагнітного випромінювання такі підсистеми, як передача цифрових сигналів, сигналів датчиків, передача інформації та сигналів автоматичного управління, можуть зазнати погіршення або втрати продуктивності [10]. Зокрема, передача зображень, що має вирішальне значення для безпілотників, які несуть обладнання для запису та камери, під впливом електромагнітних завад призводить до спотворення, зменшення кількості пікселів, зниження чіткості та збільшення кількості помилок. Перешкоди підвищують рівень бітових помилок у цифрових системах, що ставить під загрозу надійність і потенційно призводить до втрати інформації. Вплив поширюється на бортове електронне обладнання БПЛА, впливаючи на точність відображення

даних. Під впливом електромагнітних завад система автоматичного керування може вийти з ладу і втратити контроль, що загрожує загальній надійності та безпеці системи. Чутливі електронні компоненти системи керування, зокрема крокові двигуни та перемикачі, є чутливими до таких перешкод. У контрольованому експерименті було виявлено, що перешкоди з напруженістю поля 10 В/м переривали зв'язок між БПЛА і наземним контролером, позбавляючи контролер можливості керувати критично важливими компонентами, такими як кроковий двигун рульового управління.

У сфері наземних сегментів БПЛА конфігурація локальних мереж для базових станцій має відмінні риси, що мають вирішальне значення для безперебійної та безпечної роботи. Оскільки попит на БПЛА стрімко зростає, забезпечення їхньої безпечної та ефективної експлуатації набуває першочергового значення, що вимагає якісного зв'язку між БПЛА та їхніми наземними пілотами або користувачами.

Центральне місце в експлуатації БПЛА посідають наднадійні і безпечні канали для управління і зв'язку. Ці канали полегшують обмін критично важливими повідомленнями між БПЛА і землею, забезпечуючи точний і оперативний контроль над літальним апаратом. На додаток до цього в гру вступає високошвидкісний зв'язок з корисним навантаженням, який слугує каналом для передачі зібраної або зафіксованої БПЛА інформації - наприклад, відео і зображень високої роздільної здатності - на землю.

З огляду на ці міркування, розгортання базових станцій стає ключовим завданням, особливо при визначенні їх оптимального 3D-розміщення. Стратегічне позиціонування базових станцій має першорядне значення, оскільки їх неправильне розміщення створює загрозу безпеці, порушуючи забезпечення зв'язку. Потенційні ризики безпеки, особливо у вигляді атак на відмову в обслуговуванні, дуже великі. Неправильне розташування базових станцій може вимагати збільшення потужності передачі, що призводить до марнотратства енергії та виснаження заряду акумулятора. Такий сценарій призводить до необхідності коригувальних переміщень, частішої підзарядки і загального

зниження операційної ефективності. Усвідомлення і вирішення цих проблем має фундаментальне значення для підвищення надійності і безпеки мереж наземного сегмента БПЛА, що сприятиме загальному успіху місії БПЛА.

Існують різні методи встановлення зв'язку з БПЛА (рис. 1.4). Наприклад, пілоти можуть використовувати супутникову систему для керування БПЛА, але такий підхід є дорогим і непрактичним для малих БПЛА. Найпоширенішим методом зв'язку та керування БПЛА є радіоуправління.

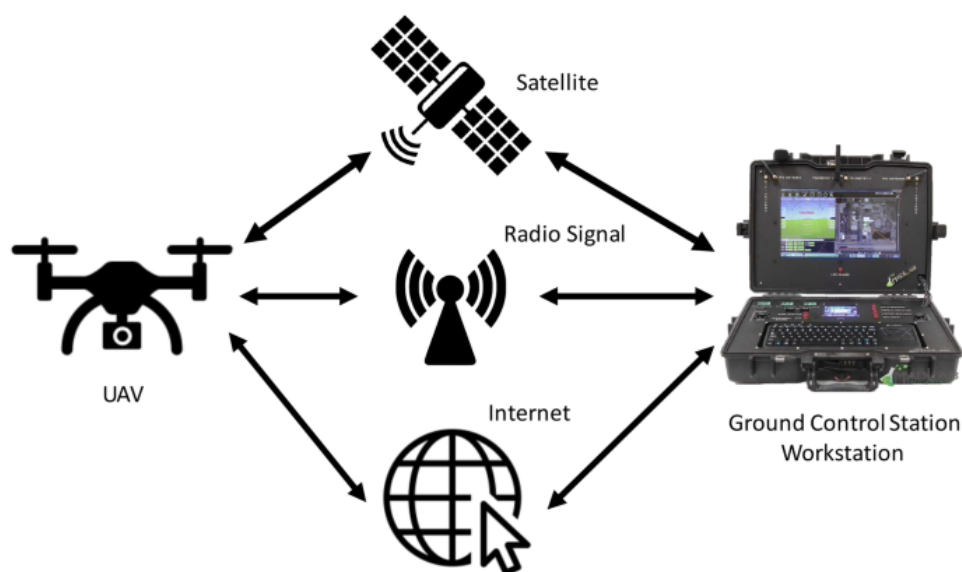


Рис. 1.4. Традиційні методи управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) за допомогою наземних станцій управління як в ручному, так і в автономному сценарії місії.

У поєднанні з наведеними факторами, наступні особливості визначають характеристики локальних мереж в базових станціях БПЛА:

– Дальність зв'язку: Локальні мережі налаштовані таким чином, щоб забезпечити достатню дальність зв'язку між базовими станціями та БПЛА, забезпечуючи безперебійний зв'язок навіть тоді, коли БПЛА працюють на значних відстанях від наземних станцій управління.

– Зв'язок з низькою затримкою: Операції з використанням БПЛА часто вимагають зв'язку в режимі реального часу для швидкого прийняття рішень і управління. Локальні мережі надають пріоритет зв'язку з низькою затримкою, щоб мінімізувати затримки між командами наземного управління та відповідями БПЛА.

– Масштабованість для операцій флоту безпілотників: Операції з

використанням БПЛА часто передбачають спільну роботу цілих флотів безпілотників. Локальні мережі призначені для ефективного масштабування, задовольняючи комунікаційні потреби декількох БПЛА одночасно, незалежно від того, чи працюють вони незалежно або як частина скоординованого парку.

– Інтеграція з сенсорами та корисним навантаженням: БПЛА оснащуються різноманітними датчиками і корисним навантаженням для виконання таких завдань, як зйомка, спостереження або збір даних. Локальні мережі легко інтегруються з цими пристроями, полегшуючи ефективну передачу даних між БПЛА і наземними станціями управління.

– Автономні операції: Локальні мережі підтримують автономні операції, дозволяючи БПЛА спілкуватися і координувати завдання без постійного втручання людини. Така автономність вимагає складних протоколів зв'язку в локальній мережі для забезпечення безперебійної координації.

### **Висновки за розділом**

Комплексний аналіз комп'ютерних мереж у контексті інформаційних технологій свідчить про зростаючу залежність від них, що підкреслює необхідність посилення заходів безпеки. Вразливість мереж до хакерських атак і шкідливого програмного забезпечення через їх різноманітні зв'язки і взаємодію з різними мережами стає критично важливою проблемою. Фокус зміщується на необхідний захист локальних комп'ютерних мереж (*LAN*) для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних в організаціях. Спектр загроз кібербезпеки, що охоплює фізичні, системні, пов'язані з ідентифікацією, пов'язані з кабелями та зловмисним програмним забезпеченням, підкреслює еволюцію викликів, з якими стикаються ці мережі.

У сфері безпеки локальних мереж стає очевидним вплив факторів навколишнього середовища, особливо в операціях з великими обсягами даних. Непередбачуваний характер природного середовища, включаючи катастрофи та екстремальні умови, становить загрозу для безпеки локальних мереж. У тексті



викладені міркування для організацій щодо включення факторів навколишнього середовища в комплексні стратегії кібербезпеки, підкреслюючи вразливість мережевої інфраструктури, електропостачання, центрів обробки даних і телекомунікаційної інфраструктури до стихійних лих. Стійкість, надмірність і стратегії резервного копіювання підкреслюються як важливі елементи пом'якшення впливу факторів навколишнього середовища.

Людський вплив стає критичним елементом, що впливає на безпеку локальних мереж, оскільки хакерські атаки використовують відкриту природу Інтернету, а дії користувачів сприяють виникненню проблем з безпекою. У тексті окреслено ключові аспекти людського впливу, включаючи обізнаність користувачів, загрози соціальної інженерії, практики автентифікації, інсайдерські загрози, обізнаність про фішинг, безпеку пристроїв, дотримання політик, реагування на інциденти, практики контролю доступу, питання *BYOD* та культурні аспекти.

Переходячи до військового контексту, фокус зміщується на захист від електромагнітних завад. Електронні пристрої, що випромінюють радіохвилі у військових системах, можуть призвести до збоїв у роботі, що підкреслює вирішальну роль захисту від радіовипромінювання.

Досліджуються механізми поглинання, відбиття і багаторазового внутрішнього відбиття, причому електропровідність визначена як найважливіший параметр ефективного екранування. Міркування щодо ефективного радіоекранування передбачають пошук балансу між найважливішими параметрами і пов'язаними з ними витратами, що нагадує думку Чехова про те, що чистота зберігається там, де не сміять. У розділі підкреслюється важливість не лише покладатися на методи екранування, а й зменшувати електромагнітне випромінювання в його джерелі. Він встановлює стислий набір критеріїв для стратегій радіоекранування:

- Топологія мережі
- Тип і якість кабелю
- Відстань і потужність сигналу
- Надійність мережі

Виявлені ризики в поєднанні з критеріями захисту від радіовипромінювань

підкреслюють зростаючу загрозу радіовипромінювань у локальних мережах, що посилює вразливість системи перед потенційними супротивниками.

Аналіз поширюється на забруднення електромагнітним випромінюванням, підкреслюючи ризики для електронного обладнання, здоров'я людей, військової безпеки та цивільних комунальних послуг. Високопродуктивні електронні пристрої, в тому числі базові станції БПЛА, роблять значний внесок у це випромінювання. Вразливість базових станцій БПЛА до виявлення в електромагнітному спектрі створює виклики безпеці, вимагаючи контрзаходів для захисту від ненавмисних і навмисних електромагнітних перешкод.

Крім цього, розглядаються особливості локальних мереж базових станцій БПЛА, що мають вирішальне значення для безперебійної та безпечної роботи. Попит на безпечну та ефективну експлуатацію БПЛА підкреслює важливість високонадійних і захищених каналів управління та зв'язку. Оптиміальне розміщення базових станцій стає ключовим завданням, оскільки неправильне розміщення може призвести до ризиків для безпеки. Характеристики локальних мереж, такі як дальність зв'язку, низька затримка зв'язку, масштабованість для операцій флоту, інтеграція з датчиками і корисним навантаженням, а також підтримка автономних операцій, мають важливе значення для загального успіху місій БПЛА. Розуміння і вирішення цих питань має вирішальне значення для підвищення надійності і безпеки наземних мереж БПЛА.

## РОЗДІЛ 2

### ОЦІНКА БАЗОВИХ ТОПОЛОГІЙ

#### 2.1. Порівняльний аналіз базових топологій

Однією з великих проблем є нездатність розробника системи усунути всі шуми. Топологія мережі відіграє вирішальну роль у проектуванні та реалізації локальних мереж для наземних систем БПЛА [11]. Вона визначає, як з'єднані компоненти мережі і як проходять потоки даних всередині мережі. Дві найпоширеніші мережеві топології, що використовуються в наземних системах БПЛА:

– Топологія "зірка". У топології "зірка" всі компоненти мережі підключаються до центрального концентратора або комутатора. Наземна станція управління, системи планування місії, оператори корисного навантаження та інші компоненти підключаються до центрального концентратора індивідуально. Така топологія забезпечує централізований контроль і управління, а також простоту усунення несправностей і технічного обслуговування. Зв'язок між компонентами, як правило, здійснюється через центральний концентратор, який виступає в ролі ретранслятора для обміну даними. Однак залежність від центрального концентратора робить мережу вразливою до єдиної точки відмови. Якщо хаб виходить з ладу, зв'язок між компонентами може бути перерваний.

– Топологія "*Mesh*". *Mesh* топологія передбачає децентралізоване з'єднання мережевих компонентів, утворюючи сітчасту структуру. Кожен компонент, такий як наземна станція управління, системи планування польотів і оператори корисного навантаження, з'єднаний безпосередньо з декількома іншими компонентами. Це створює надлишкові шляхи зв'язку і підвищує надійність та відмовостійкість. У *Mesh* топології, якщо одне з'єднання або вузол виходить з ладу, мережа може автоматично перенаправляти дані альтернативними шляхами. *Mesh* топологія забезпечує гнучкість і масштабованість, оскільки нові компоненти можуть бути легко додані до мережі. Однак складність управління та налаштування *mesh*-мережі зростає зі збільшенням кількості компонентів.

– Оскільки нашим головним пріоритетом у цій моделі є зменшення загального шуму, має сенс зробити кабелі якомога коротшими. Впроваджуючи *Mesh* топологію, ми можемо значно зменшити загальну довжину кабельних ліній порівняно з топологією "зірка". *Mesh* топологія пропонує більшу гнучкість в розташуванні компонентів мережі і дає можливість оптимізувати кабельні маршрути на основі близькості. Розробимо невеликий експеримент, щоб оцінити ці мережеві топології для наземних станцій БПЛА.

### **2.1.1. Постановка експерименту**

Для проведення експерименту ми взяли сценарій із 10 базовими станціями, розташованими на сітці розміром 10x10 кілометрів, що складає загальну площу у 100 квадратних кілометрів. Це обрано як основу для вивчення та оцінки різних топологій мережі, спеціально адаптованих для наземних станцій БПЛА (безпілотних літальних апаратів).

У цьому контексті експерименту використовуватимуться лише координати  $X$  та  $Y$ , ігноруючи висоту. Це обумовлено тим, що висота, хоча є важливою для кінцевої системи, становить лише ще одну змінну, яка використовується для розрахунку довжини кабелю. Оскільки кожен експеримент у цьому контексті використовує однакову методологію, можна відкинути цю метрику для спрощення розрахунків.

Такий підхід дозволяє зосередитися на розташуванні базових станцій в площині, їх взаємодії та взаємовідстані, що важливо для визначення оптимальної топології для забезпечення ефективного зв'язку між станціями БПЛА.

### **2.1.2. З'єднання**

У топології "Зірка" кожна базова станція у мережі має пряме кабельне з'єднання із центральним концентратором (рис. 2.1). Це означає, що всі дані, які передаються між базовими станціями, спрямовані через центральний вузол. Централізована природа такої топології призводить до того, що вся комунікація в мережі відбувається через центральний вузол, а базові станції не мають прямих кабельних з'єднань одна з одною.

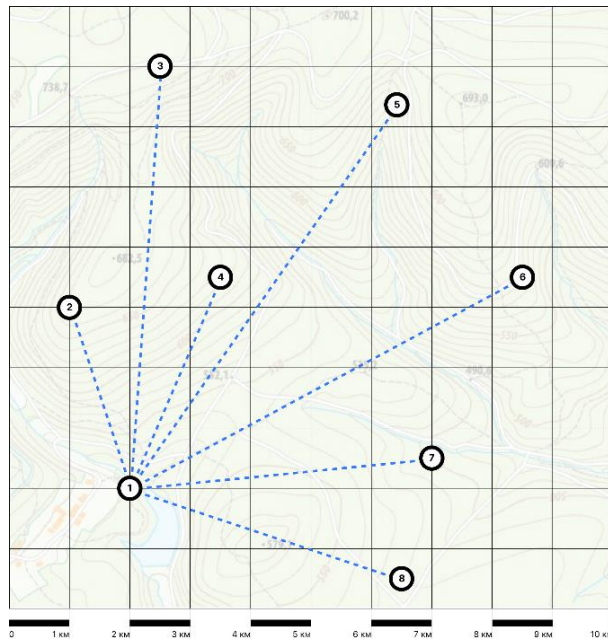


Рис. 2.1. Мережа, побудована за топологією “Зірка”

З іншого боку, у топології "*Mesh*" ми вибираємо найпростіший варіант, при якому кожна базова станція прямо з'єднана з усіма своїми сусідніми станціями за допомогою прямих кабельних з'єднань (рис. 2.2). Кожна станція має прямий лінійний зв'язок із всіма іншими станціями в мережі, що утворює певний вид "павутиння" зв'язків. Це дозволяє даній топології бути більш гнучкою і забезпечувати альтернативні шляхи для передачі даних, що підвищує стійкість мережі та ефективність комунікації між станціями.

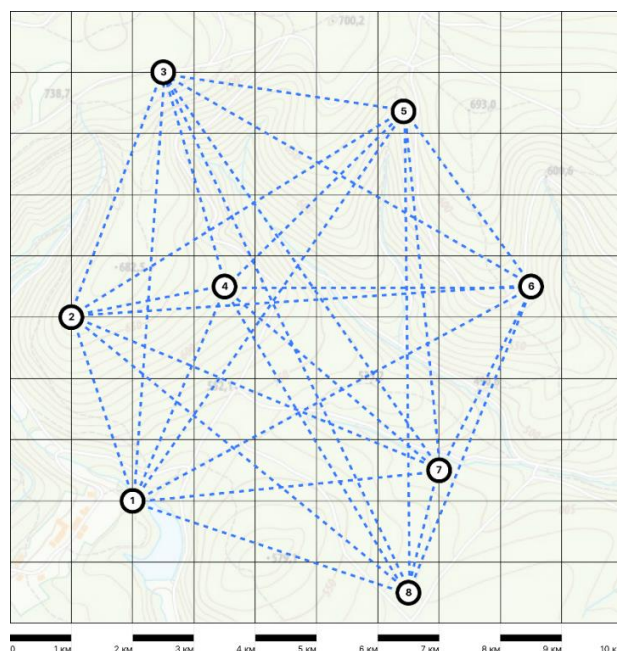


Рис. 2.2. Мережа, побудована за топологією “*Mesh*”

### 2.1.3. Вимірювання довжини кабелю

У таблиці 2.1 представлена топологія типу "Зірка" для восьми вузлів мережі. Кожна клітина містить відстань (в кілометрах) між вузлами з номерами, вказаними в заголовках стовбців та рядків. Наприклад, відстань між вузлами 1 та 2 дорівнює 3.1623 км, між 1 та 3 - 6.9680 км, і так далі. Останній стовпчик та рядок містять сумарні відстані від кожного вузла до всіх інших.

У таблиці 2.2 представлена топологія типу "Mesh" для восьми вузлів мережі. Кожна клітина містить відстань (в кілометрах) між вузлами, вказаними в заголовках стовбців та рядків. Знак "\*" вказує на відсутність прямого з'єднання між вузлами (вони не безпосередньо з'єднані). Наприклад, відстань між вузлами 1 та 2 дорівнює 3.1623 км, між 1 та 3 - 6.9680 км, і так далі. Останній стовпчик та рядок містять сумарні відстані від кожного вузла до всіх інших. Загальна сума вказана у нижньому правому куті таблиці, дорівнює 305.03 км.

Симетрія в таблицях є невід'ємною властивістю, що впливає з визначення задачі мінімального остовного дерева.

Таблиця 2.1

Топологія "Зірка"

	2	3	4	5	6	7	8	Всього, км
	3.1623	6.9680	3.8079	7.7451	7.3824	5.0249	4.7434	38.8340

Таблиця 2.2

Топологія "Mesh"

#	1	2	3	4	5	6	7	8	Всього, км
1	*	3.1623	6.9680	3.8079	7.7451	7.3824	5.0249	4.7434	38.83
2	3.1623	*	4.2720	2.5593	6.3855	7.5166	6.5000	7.1063	37.50
3	6.9680	4.2720	*	3.5920	3.9740	6.9298	7.8646	9.3532	42.95
4	3.8079	2.5593	3.5920	*	4.0943	5.0100	4.6098	5.8207	29.49
5	7.7451	6.3855	3.9740	4.0943	*	3.5364	5.8886	7.8604	39.48

#	1	2	3	4	5	6	7	8	Всього, км
6	7.3824	7.5166	6.9298	5.0100	3.5364	*	3.3541	5.3926	39.12
7	5.0249	6.5000	7.8646	4.6098	5.8886	3.3541	*	2.0616	35.30
8	4.7434	7.1063	9.3532	5.8207	7.8604	5.3926	2.0616	*	42.34
									305.03

#### 2.1.4. Аналіз надійності

У топології "Зірка" намалювання всіх зв'язків від кожної станції до базової станції (в даному випадку, станції 1) створює централізовану структуру, де всі дані проходять через цю базову станцію. Однак, це призводить до серйозного недоліку: при враженні чи відмові базової станції (станції 1), вся мережа стає недоступною. Також, навіть внаслідок враження одного кабелю (наприклад, між станцією 1 та станцією 5), кінцева станція (5) втрачає будь-який зв'язок із іншими станціями в мережі, оскільки всі дані повинні проходити через базову станцію.

Навпаки, топологія "*Mesh*" вирішує ці проблеми завдяки багатостороннім зв'язкам між станціями. Кожна станція має прямий зв'язок із кожною іншою станцією в мережі, утворюючи мережевий "павутиння". Це означає, що навіть при враженні станції чи відмові кабелю, пакети даних все одно можуть знайти альтернативний шлях до свого місця призначення через інші лінії зв'язку. Така резилієнтність забезпечує неперервність зв'язку в мережі "*Mesh*" при виникненні відмов чи вражень.

#### 2.1.5. Аналіз затримок

Для повнішого розуміння впливу топології на затримку передачі повідомлень, розглянемо важливі аспекти цього процесу в кожній топології.

У топології "Зірка", де всі з'єднання виходять з базової станції, загальна затримка передачі повідомлення прямо пропорційна довжині кабельного з'єднання. Це означає, що незалежно від того, якою станцією відправлено повідомлення і до якої станції воно направлено, воно проходить через один і той самий шлях - базову станцію. Така централізована структура призводить до рівномірної затримки, але в

той же час стає вразливою до відмови базової станції або пошкодження кабелю, що призводить до втрати зв'язку.

Насупротив, топологія "*Mesh*" створює безліч прямих фізичних з'єднань між станціями, що дозволяє вибрати коротший шлях для передачі повідомлення. В результаті, зменшується загальна затримка в передачі даних, особливо між станціями, які мають пряме з'єднання. У випадку відмови або пошкодження кабелю, мережа може використовувати альтернативні шляхи для обходу проблеми, забезпечуючи більшу надійність та знижуючи можливі втрати зв'язку.

Отже, топологія "*Mesh*" виявляється більш дієвою у ситуаціях, де важлива низька затримка та стійкість мережі до відмов. Тим часом, топологія "Зірка" надає рівномірну затримку, але при цьому стає менш стійкою до відмов та обмежує можливість використання альтернативних шляхів.

## **2.2. Методи оптимізації прокладання кабелів**

Оптимізація прокладки кабелів є важливим аспектом проектування ефективних і надійних дротових мереж у різних сферах застосування. Вона передбачає визначення оптимальних шляхів і з'єднань для кабелів, щоб мінімізувати їхню довжину, зменшити втрати сигналу і підвищити продуктивність мережі.

Для вирішення проблеми з надлишковими з'єднаннями в *mesh*-мережі використовуються алгоритми остовних дерев. При поєднанні *Mesh* топології з протоколом остовних дерев можна досягти балансу між скороченням довжини кабелів і збереженням надійності та відмовостійкості мережі.

Мінімальні остовні дерева і, зокрема, протокол *Spanning Tree Protocol*, є частиною *IEEE 802.1* - набору стандартів, визначених Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (*IEEE*), які стосуються мережевих протоколів і сервісів на каналному і мережевому рівнях моделі *OSI* [12]. Стандарти *IEEE 802.1* спрямовані на підвищення продуктивності, надійності та безпеки мережі. *IEEE 802.1* включає в себе різні підстандарты, які охоплюють різні аспекти роботи та управління мережею.

Алгоритм Борувки, алгоритм Крускала та алгоритм Прима - це три найпоширеніші алгоритми для розв'язання задачі мінімального остовного дерева



(*MST*) в теорії графів [13]. Кожен алгоритм підходить до проблеми дещо по-різному, але має на меті знайти мінімальну за вагою множину ребер, що з'єднує всі вершини заданого зваженого неорієнтовного графа.

### 2.2.1. Алгоритм Борувки

У 1925 році до Борувки звернувся працівник Західно-Моравської електростанційної компанії з проханням допомогти з проектуванням електричної мережі для певної місцевості. Завдання, яке перед ним стояло, можна сформулювати наступним чином: Спроекувати найдешевшу електричну мережу, що з'єднує всі задані міста в Західній Моравії. З наведених вище визначень зрозуміло, що Борувку попросили сказати, яким є мінімальне остовне дерево для цієї області. Однак Борувка не знав термінології графів, з якою ми знайомі сьогодні: це було за десять років до того, як Кьоніг написав свою класичну книгу "Теорія скінченних і нескінченних графів". Таким чином, математичне формулювання проблеми Борувка використовує матричну термінологію [14].

Алгоритм Борувки - це метод, який використовується в теорії графів для визначення мінімального остовного дерева (*MST*) зв'язного, зваженого графа. Метою цього алгоритму є визначення підмножини ребер, яка утворює дерево, що охоплює всі вершини з найменшою можливою сумарною вагою ребер.

Послідовність роботи алгоритму:

– Ініціалізація: почніть з порожнього набору ребер, що представляє мінімальне остовне дерево. Кожна вершина розглядається як окремий компонент.

– Ітераційний процес: алгоритм повторюється до тих пір, поки не залишиться тільки один компонент, що означає, що всі вершини з'єднані. Під час кожної ітерації для кожного компонента визначається ребро з мінімальною вагою, що з'єднує його з іншим компонентом, після чого ці ребра додаються з мінімальною вагою до мінімального остовного дерева, а компоненти, які з'єднані вибраними ребрами, об'єднуються.

– Завершення: процес зупиняється, коли залишиться лише один компонент, що вказує на те, що всі вершини з'єднані.

В якості прикладу розглянемо простий граф, наведений на рис. 2.3:

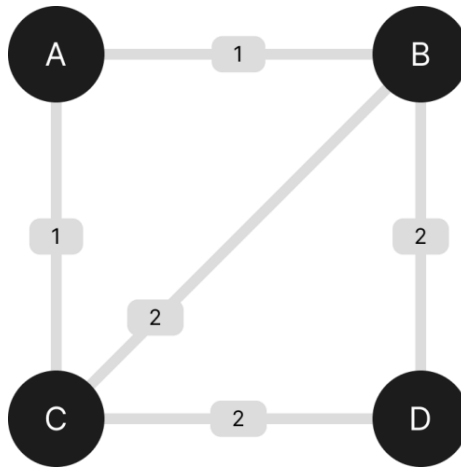


Рис. 2.3. Початковий граф

Почнемо з порожнього набору ребер:  $MST = \{\}$ . Кожна вершина є окремою компонентою:  $\{A\}, \{B\}, \{C\}, \{D\}$ .

На першій ітерації визначаємо ребра з мінімальною вагою:

- Вибираємо ребро  $AC$  з вагою 1.
- Вибираємо ребро  $BD$  з вагою 2.
- Додаємо ці ребра до мінімального остовного дерева і об'єднуємо компоненти:

$MST = \{AC, BD\}$ , компоненти:  $\{A, C\}, \{B, D\}$ .

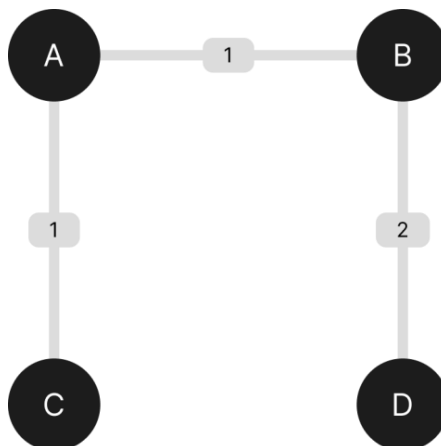
– На другій ітерації визначаємо ребра з мінімальною вагою:

- Вибираємо ребро  $AB$  з вагою 1.
- Додаємо це ребро до мінімального остовного дерева і об'єднуємо

компоненти:  $MST = \{AC, BD, AB\}$ , компоненти:  $\{A, B, C, D\}$ .

Завершаємо роботу алгоритму, оскільки залишився лише один компонент.

Отримане мінімальне остовне дерево (рис. 2.4):



## Рис. 2.4. Кінцевий граф

Алгоритм Борувки має часову складність  $O(E \log V)$ , де  $E$  - кількість ребер, а  $V$  - кількість вершин у графі. Така ефективність робить його особливо придатним для розріджених графів.

### 2.2.2. Алгоритм Крускала

Стаття Борувки мала німецький реферат, який якимось чином потрапив до Принстона в США. Тут Джозеф Крускаль, натхненний нею, прийшов до свого розв'язання задачі про мінімальне остовне дерево. У своїх спогадах про мінімальне остовне дерево (або, як він вважає за краще говорити, "найкоротше остовне піддерево") він каже: «Хтось передав мені дві сторінки дуже крихкого паперу, скріплені разом. Він сказав мені, що це "лежить на кафедрі математики". Сторінки були надруковані на машинці, скопійовані на копіювальній машині, німецькою мовою. Я так і не дізнався, хто і навіщо друкував цю роботу [14].»

Очевидно, що "крихкий папір" був рефератом статті Борувки. Крускаль знайшов це рішення занадто складним і запропонував більш зрозумілий спосіб вирішення проблеми, опубліковане в 1956 році.

Алгоритм Крускала - це відомий метод в теорії графів, який використовується для знаходження мінімального остовного дерева (МДД) зв'язного, зваженого графа. Його основною метою є визначення підмножини ребер, які утворюють дерево, що охоплює всі вершини з мінімально можливою сумарною вагою ребер.

Порядок роботи алгоритму:

- Ініціалізація: почніть з порожнього набору ребер, що представляє мінімальне остовне дерево. Кожна вершина розглядається як окремий компонент.
- Сортування ребер: впорядкувати ребра графа у порядку зростання на основі їх ваг.
- Ітеративний процес: обхід відсортованих ребер, додавання кожного ребра до мінімального остовного дерева, якщо воно не створює циклу. Структура даних *Union-Find* зазвичай використовується для ефективного відстеження та управління зв'язністю вершин.

– Завершення: припиніть процес, коли в мінімальному остовному дереві залишиться  $V-1$  ребер, де  $V$  - кількість вершин у графі.

В якості прикладу розглянемо простий граф, наведений на рис. 2.5:

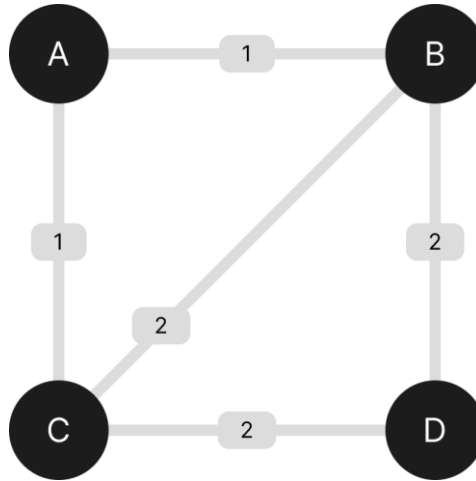


Рис. 2.5. Початковий граф

Почнемо з порожнього набору ребер:  $MST = \{\}$ . Кожна вершина є окремою компонентою:  $\{A\}$ ,  $\{B\}$ ,  $\{C\}$ ,  $\{D\}$ . Відсортуємо ребра за зростанням:  $[(AC, 1), (AB, 1), (BD, 2), (BC, 2), (CD, 2)]$ .

Додаємо ребра до мінімального остовного дерева у відсортованому порядку, не допускаючи утворення циклів:

- Додаємо ребро  $AC$  з вагою 1.
- Додаємо ребро  $AB$  з вагою 1.
- Додаємо ребро  $BD$  з вагою 2.
- Додаємо ребро  $CD$  з вагою 2.

Завершити роботу алгоритму, оскільки в мінімальному остовному дереві залишилось  $V-1 = 3$  ребра.

Отримане мінімальне остовне дерево (рис. 2.6):

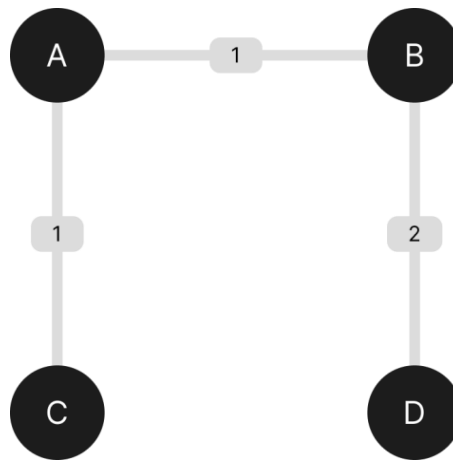


Рис. 2.6. Кінцевий граф

Алгоритм Крускала має часову складність  $O(E \log V)$ , де  $E$  - кількість ребер, а  $V$  - кількість вершин у графі. Сортування ребер домінує у часовій складності, що робить його придатним для розріджених графів.

### 2.2.3. Алгоритм Прима

Алгоритм Прима - це фундаментальний графовий алгоритм, який використовується для визначення мінімального остовного дерева (МДД) зв'язного, зваженого графа. Його основна мета - знайти підмножину ребер, яка утворює дерево, що охоплює всі вершини з мінімально можливою сумарною вагою ребер.

Робота алгоритму [14]:

– Ініціалізація: почніть з довільної вершини як початкового компонента. Зберігаємо два набори вершин: один включений до ОЗДП, а інший ще не включений. Почніть з порожнього набору ребер для мінімального остовного дерева.

– Жадібний підхід: на кожному кроці вибираємо ребро з мінімальною вагою, яке з'єднує вершину в Остовному дереві з вершиною поза ним. Додайте це вибране ребро до мінімального остовного дерева. Включіть новоприєднану вершину до множини  $MST$ .

– Завершення: припиніть процес, коли всі вершини будуть включені в  $MST$ .

В якості прикладу розглянемо простий граф, наведений на рис. 2.7:

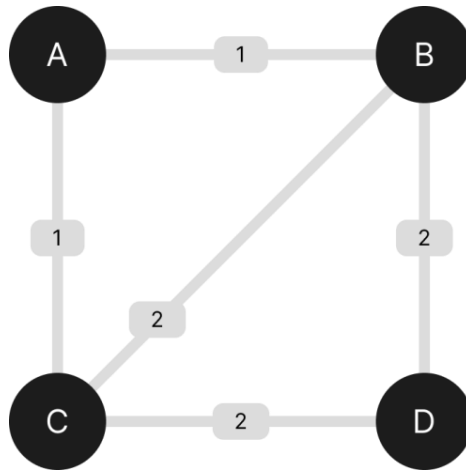


Рис. 2.7. Початковий граф

Починаємо з вершини  $A$  як початкового компонента. Множина  $MST$ :  $\{A\}$ , не- $MST$  множина:  $\{B, C, D\}$ . Мінімальна кількість ребер остовного дерева:  $\{\}$ .

Вибираємо ребро  $AC$  з вагою 1, додаємо його до  $MST$ . Множина  $MST$ :  $\{A, C\}$ , не- $MST$ :  $\{B, D\}$ . Вибираємо ребро  $AB$  з вагою 1 і додаємо його до  $MST$ . Множина  $MST$ :  $\{A, B, C\}$ , не- $MST$ :  $\{D\}$ . Вибираємо ребро  $BD$  з вагою 2, додаємо його до  $MST$ . Множина  $MST$ :  $\{A, B, C, D\}$ , не- $MST$ :  $\{\}$ .

Завершуємо процес, оскільки всі вершини тепер є частиною  $MST$ .

Отримане мінімальне остовне дерево (рис. 2.8):

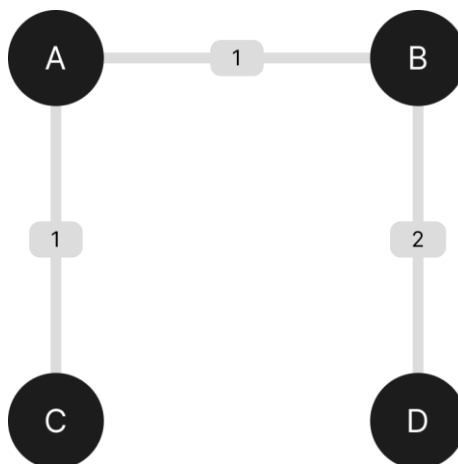


Рис. 2.8. Кінцевий граф

Алгоритм Прима має часову складність  $O(V^2)$  з представленням графа у вигляді матриці суміжності. Однак, з ефективними структурами даних, такими як купи Фібоначчі, часова складність може бути зменшена до  $O(E + V \log V)$ , де  $E$  - кількість ребер, а  $V$  - кількість вершин у графі.

#### 2.2.4. Результати

В контексті оптимізації прокладання кабелів ці алгоритми можуть бути застосовані для пошуку оптимального набору кабельних з'єднань між наземними станціями в мережах БПЛА. Враховуючи вагу ребер (довжину кабелю), алгоритми можуть визначити мінімальне остовне дерево, яке мінімізує кількість прокладених кабелів і оптимізує мережевий зв'язок. Отримане мінімальне остовне дерево забезпечує ефективну та надійну топологію дротової мережі для наземних станцій БПЛА, зменшуючи довжину кабелів та покращуючи загальну стабільність мережі, відмовостійкість та стійкість до мережевих петель.

Кожен з них має практично однакову складність, тому ми вирішили, який з них використовувати. Після оцінки різних алгоритмів оптимізації прокладки кабелів, алгоритм Борувки був обраний як найкраще рішення для мінімізації прокладки кабелів в мережах наземних станцій БПЛА. На вибір алгоритму Борувки вплинули наступні фактори:

1. Ефективність з'єднання роз'єднаних підграфів - алгоритм Борувки ефективно з'єднує роз'єднані або ізольовані підграфи, присутні в мережі. Ітеративно вибираючи ребра з мінімальною вагою для кожного вузла та об'єднуючи підграфи, алгоритм забезпечує швидке з'єднання, в результаті чого утворюється єдине мінімальне остовне дерево. Ця характеристика безпосередньо призводить до зменшення кількості прокладених кабелів, необхідних для встановлення з'єднання з мережею.

2. Створення мінімального остовного дерева з меншою кількістю ребер - мінімізація кількості прокладених кабелів передбачає усунення надлишкових з'єднань і циклів у топології мережі. Алгоритм Борувки відомий своєю здатністю створювати мінімальне остовне дерево з меншою кількістю ребер. Ця властивість є особливо корисною в мережах наземних станцій БПЛА, де зменшення довжини кабелів має вирішальне значення для оптимізації продуктивності мережі, зниження вартості та підвищення відмовостійкості.

3. Підходить для великих мереж з розрідженим розподілом по периметру - мережі наземних станцій БПЛА часто охоплюють значну кількість вузлів з розрідженим розподілом ребер. Алгоритм Борувки добре підходить для таких мереж,

оскільки він ефективно працює з великими мережами та ефективно з'єднує роз'єднані підграфи. Така масштабованість гарантує, що навіть у великих мережах алгоритм може забезпечити рішення, яке мінімізує прокладку кабелів та оптимізує мережевий зв'язок.

## **Висновки за розділом**

В ході проведеного експерименту було встановлено, що топологія "Зірка" виявилася більш ефективною з точки зору загальної довжини кабеля, однак зазнала значних обмежень у відношенні надійності мережі. Система, заснована на цій топології, виявилася вразливою до відмови базової станції 1, що спричиняє відмову всієї мережі. Це вказує на важливість розгляду альтернативних топологій для забезпечення стійкості мережі при можливих відмовах окремих вузлів.

Насупроти цьому, топологія "*Mesh*", хоча вона додає значну кількість додаткових з'єднань, виявилася більш надійною, забезпечуючи збільшену стійкість мережі до відмов окремих елементів. Однак ця перевага супроводжується зменшенням радіозахищеності, що може бути критичним у деяких сценаріях експлуатації. Треба відзначити, що топологія "*Mesh*" ідеально підходить як стартова точка для подальшої оптимізації. Вона вже відзначається покращеною затримкою та високою надійністю, що робить її привабливою для подальших вдосконалень.

Розгляд різних топологій у контексті ефективності та стійкості вказує на потребу в пошуку балансу між цими параметрами. Починаючи з топології "*Mesh*" і використовуючи оптимізаційні методи, можна досягти оптимальної структури мережі, яка враховує вимоги до надійності та витрати кабелю, що є ключовим для ефективності та стабільності системи.

У сфері локальних мереж базових станцій БПЛА вибір алгоритмів оптимізації відіграє ключову роль у підвищенні ефективності мережі та мінімізації використання ресурсів. Серед різних розглянутих алгоритмів алгоритм Боровки виявляється найбільш сприятливим варіантом для вирішення конкретного завдання мінімізації довжини кабелю в мережах наземних станцій БПЛА.



Це обґрунтовано його ефективністю у з'єднанні роз'єднаних підграфів, створенням мінімального остовного дерева з меншою кількістю ребер і відмінною придатністю для великих мереж з розрідженим розподілом по периметру. Оптимізована структура мінімального остовного дерева не тільки мінімізує витрати, пов'язані з розгортанням кабелю, але й захищає мережу від потенційних збоїв, забезпечуючи надійний і безвідмовний зв'язок.

Починаючи з порожнього графа та ітеративно обираючи ребра мінімальної ваги для кожного вузла, алгоритм Борувки швидко та ефективно з'єднує підграфи, утворюючи мінімальне остовне дерево. Це призводить до зменшення кількості прокладених кабелів, що є ключовим аспектом оптимізації мережі. Додатково, алгоритм Борувки відзначається здатністю створювати мінімальне остовне дерево з меншою кількістю ребер, що особливо важливо для зменшення вартості та підвищення відмовостійкості мережі.

Крім того, алгоритм підходить для великих мереж з розрідженим розподілом по периметру, що характерно для мереж наземних станцій БПЛА. Його масштабованість гарантує, що оптимальне рішення може бути досягнуте навіть у великих та складних мережах, що підтверджує його придатність для застосування в даному контексті.

Враховуючи усі ці фактори, алгоритм Борувки виявляється оптимальним вибором для мінімізації довжини кабелів у мережах наземних станцій БПЛА. Використовуючи сильні сторони алгоритму Борувки, такі мережі можуть досягти оптимального балансу між продуктивністю, використанням ресурсів і відмовостійкістю, тим самим створюючи основу для ефективних і надійних систем зв'язку.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

Алгоритм Борувки виявляється оптимальним вибором для вирішення задачі оптимізації кабельних з'єднань в мережах наземних станцій безпілотних літальних апаратів. Його ефективність виявляється особливо великою в контексті великих мереж з розподілом по периметру, яке є типовим для систем БПЛА [15]. Масштабованість алгоритму забезпечує оптимальні рішення навіть у великих і складних мережах, надаючи підтвердження його застосовності у вказаному контексті.

#### 3.1. Реалізація обраного алгоритму оптимізації

Код, наведений у додатку А, реалізує алгоритм Борувки у класі *Graph*. Цей клас інкапсулює основні функції для додавання ребер, ідентифікації компонентів та виконання алгоритму. Розглянемо ключові компоненти коду:

1. Ініціалізація графа: Клас *Graph* ініціалізується кількістю вершин і створюються структури для зберігання ребер та компонентів.

2. Додавання ребер: Метод *add\_edge* дозволяє додавати ребра до графа, включаючи інформацію про вершини та вагу ребра.

3. Ідентифікація компонентів: Такі методи, як *find\_component* та *set\_component* відіграють важливу роль у визначенні та оновленні компонентів у графі, що є ключовим для алгоритму Борувки.

4. Операція об'єднання: Метод *union* виконує операцію об'єднання, пов'язуючи компоненти на основі їх розмірів та оновлюючи інформацію про компоненти.

5. Виконання алгоритму Борувки: Метод *boruvka* організовує виконання алгоритму борування. Він ітеративно визначає ребра мінімальної ваги, що з'єднують різні компоненти, формуючи таким чином мінімальне остовне дерево.

6. Ініціалізація графа та додавання ребер (кінець коду): В кінці фрагменту коду створюється екземпляр класу *Graph* і додаються ребра для представлення зв'язності в мережі.

7. Виконання алгоритму: Нарешті, викликається метод *boruvka*, і алгоритм запускається на ініціалізованому графі.

По суті, ця реалізація алгоритму Борувки ефективно ідентифікує і з'єднує підграфи, створюючи оптимальне мінімальне остовне дерево, яке мінімізує довжину кабелю в мережі наземних станцій БПЛА. Ефективність алгоритму демонструється за допомогою коду, що забезпечує практичний інструмент для оптимізації мережі в реальних умовах.

Використовуючи описаний вище код (додаток А), підставимо заміри із таблиці 2.2 до алгоритму Борувки. Таблиця є симетричною, ця властивість впливає з визначення задачі про мінімальне остовне дерево.

Результат роботи алгоритму наведено нижче:

-----*Forming MST*-----

{0: 1, 1: 1, 2: 2, 3:3, 4: 4, 5:5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge [0 - 1]*

*Added weight: 3.1623*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 2, 3: 1, 4: 4, 5:5, 6:6, 7: 7}

*Added edge [1 - 3]*

*Added weight: 2.5593*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 1, 4: 4, 5:5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge [2-3]*

*Added weight: 3.592*

-----

{0: 1, 1: 1, 2:1, 3:1, 4: 5, 5:5, 6:6, 7: 7}

*Added edge [4-5]*

*Added weight: 3.5364*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 1, 4: 5, 5:5, 6: 5, 7: 7}

*Added edge [5 - 6]*

*Added weight: 3.3541*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 1, 4: 5, 5:5, 6:5, 7:5}

*Added edge [6-7]*

*Added weight: 2.0616*

-----

{0: 5, 1: 5, 2:5, 3: 5, 4: 5, 5:5, 6: 5, 7: 5}

*Added edge [2-4]*

*Added weight: 3.974*

=====

*The total weight of the minimal spanning tree is: 22.2397*

Для кращого розуміння, блок-схема (рис. 3.1) візуально представляє роботу алгоритму Борувки. Ця схема ілюструє послідовні кроки та взаємодію між ключовими компонентами, забезпечуючи візуальну допомогу для розуміння потоку та функціональності алгоритму. Ця схема відповідає визначенню Борувки для задачі мінімального остовного дерева: відстані між окремими вершинами або вузлами взаємно різні. Це також є необхідною і достатньою умовою унікальності мінімального остовного дерева остовного дерева зваженого зв'язного графа.

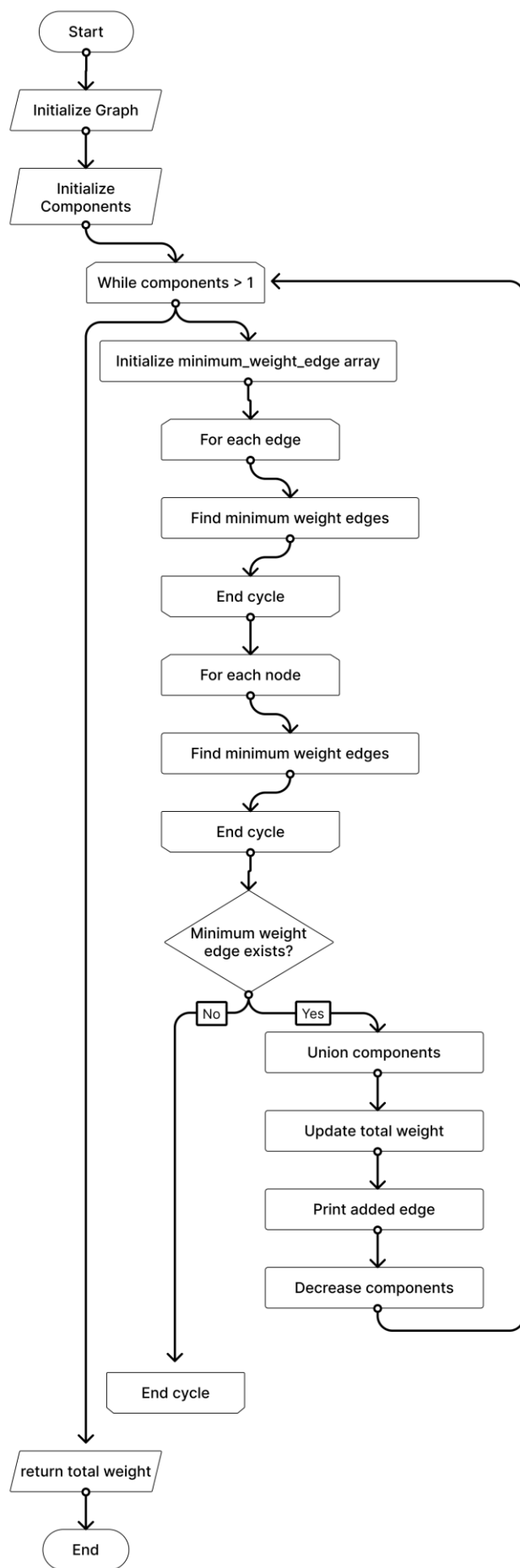


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритму

Використовуючи зв'язки, побудовані за допомогою алгоритму, будуємо та представляємо графічно оптимізовану мережу (рис. 3.2.):

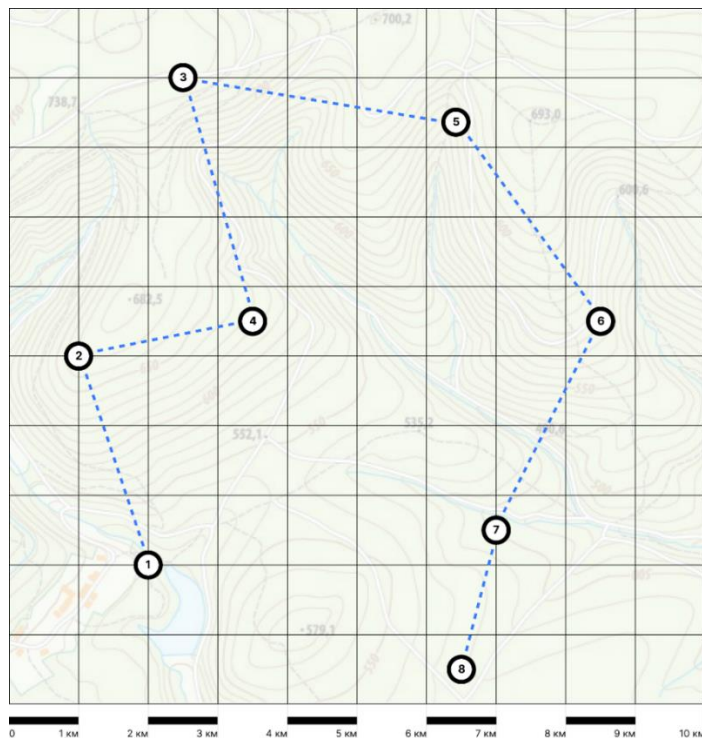


Рис. 3.2. Графічне представлення оптимізованої алгоритмом Борувки мережі

Ці візуалізації підкреслюють ефективність алгоритму Борувки в оптимізації топології мережі, створенні добре пов'язаної та ефективної структури, яка мінімізує довжину кабелів. Здатність алгоритму систематично формувати мінімальне остовне дерево, про що свідчить отримана мережа, узгоджується з його придатністю для мереж наземних станцій БПЛА, що в кінцевому підсумку сприяє покращенню зв'язності та операційної ефективності.

## 3.2. Аналіз початкової оптимізації

### 3.2.1. Вимірювання довжини кабелю

Суттєве скорочення довжини кабелю є ключовим спостереженням, яке проливає світло на ефективність оптимізаційних заходів, впроваджених у цій експериментальній ітерації. Отримане числове значення не тільки означає кількісний прогрес, але, що більш важливо, підкреслює якісне поліпшення дизайну мережі. Це

покращення означає більш ефективну і розумну конфігурацію, яка мінімізує загальну потребу в кабелях для з'єднання базових станцій.

Досягнувши довжини кабелю 22,2397 кілометрів, оптимізована конфігурація мережі демонструє похвальний стрибок вперед у порівнянні з неоптимізованими аналогами, що підтверджується даними, представленими в таблиці 3.1. Таке підвищення ефективності мережі є надзвичайно важливим і свідчить про стратегічне вдосконалення, яке сприяє сталому та економному використанню ресурсів в інфраструктурі зв'язку.

По суті, досягнуте скорочення довжини кабелю слугує відчутним показником ефективності застосованих методологій оптимізації. Це не лише вражаючий кількісний результат, але й стратегічне вдосконалення планування мережі, що відповідає ширшим цілям збереження ресурсів та операційної ефективності.

Таблиця 3.1

Загальна довжина кабелю у різних топологіях

Топологія	Загальна довжина кабелю, км
Зірка	38.83
<i>Mesh</i>	305.03
Оптимізована	22.23

### 3.2.2. Аналіз надійності

Оцінка надійності мережі в контексті оптимізації алгоритму *Boruwka* для мереж наземних станцій БПЛА проливає світло на скл адну динаміку різних топологій. На перший план виходить топологія *Mesh*, яка пропонує неперевершену надійність завдяки розгалуженій мережі взаємозв'язків між базовими станціями. Ця складна мережа зв'язків не тільки підвищує надмірність шляхів зв'язку, але й гарантує, що навіть у разі численних відмов зв'язку альтернативні маршрути будуть завжди доступні. Однак стійкість топології *Mesh* досягається за рахунок підвищеної надмірності, що є компромісом з точки зору радіозахисту.

Як показав комплексний аналіз, оптимізована мережа відповідає критеріям надійності, стратегічно дотримуючись тонкого балансу між надмірністю і

міркуваннями безпеки. Процес оптимізації, якому сприяв алгоритм Борувки, запроваджує інтелектуальний підхід до зменшення потенційних вразливостей мережі. У разі втрати зв'язку з базовою станцією або виходу з ладу лінії зв'язку оптимізована мережа динамічно розділяється на дві окремі мережі. Таке розділення слугує стратегією на випадок непередбачуваних ситуацій, дозволяючи неушкоджені сегменти підтримувати безперервність роботи, поки лінія зв'язку перебуває на ремонті. Ця особливість різко контрастує з вразливістю топології "зірка", де вихід з ладу базової станції 1 призводить до повного припинення функціонування мережі.

Важливість цих висновків підкреслюється загальною метою роботи, яка полягає у створенні відмовостійкої та безпечної інфраструктури зв'язку для наземних станцій БПЛА. Хоча топологія *Mesh* відрізняється високою надійністю, її вразливість до порушень радіозахисту вимагає ретельного розгляду. Оптимізована мережа, з її майстерно розробленим балансом між надмірністю і безпекою, є прагматичним і адаптивним рішенням. Ці висновки не лише сприяють вдосконаленню мереж наземних станцій БПЛА, але й ілюструють нюанси прийняття рішень, пов'язаних з оптимізацією складних комунікаційних інфраструктур.

### **3.2.3. Аналіз затримок**

Для розрахунку затримки передачі повідомлень між базовими станціями дещо спростимо систему, рахуючи тільки затримки безпосередньо на передачу інформацію по кабелю (тобто, відкидаємо затримку обробки, яку вносять вузли базових станцій). Як середовище передачі приймемо оптичне волокно.

Для оптичного волокна затримкою буде час проходження світлового сигналу з точки А в точку Б. У цьому експерименті повідомлення будуть передаватися за такими напрямками:

1 → 3 (замір 1)

3 → 8 (замір 2)

7 → 2 (замір 3)

Швидкість поширення світла в оптичному волокні залежить від коефіцієнта заломлення осердя волокна і визначається наступною математичною залежністю:



$$V = \frac{c}{n}$$

де  $c = 300\,000$  км/с — це швидкість світла у вакуумі;

$n$  - коефіцієнт заломлення сердечника.

Розрахуємо затримку у перерахунку на 1 км:

$$1\text{км} \div 300000\text{км/с} = 3,33\text{мкс} \quad 1\text{км} \div 300000\text{км/с} = 3,33\text{мкс}$$

В оптичному волокні отримаємо затримку, що вноситься на 1 км:  $3,33$  мкс /  $0,69 = 4,83$  мкс [16]. Відповідно, час на передачу повідомлень наведено у таблиці 3.2:

Таблиця 3.2

Час на передачу повідомлень

Замір	Зірка, мкс	<i>Mesh</i> , мкс	Оптимізована, мкс
1 (1 → 3)	33.65	33.65	44.98
2 (3 → 8)	56.56	45.17	62.43
3 (7 → 2)	39.54	31.39	97.46

Хоча затримки при передачі повідомлень в оптимізованій мережі більші, ніж в початкових топологіях, треба пам'ятати про контекст дослідження - зв'язок між базовими станціями. Хоча затримка тут також важлива, вона грає меншу роль, ніж затримка передачі між базовою станцією та окремими БАК у повітрі. При цьому ця затримка є прийнятною.

### 3.2.4. Результати

Експериментальний аналіз підкреслює стратегічний баланс між різними показниками оптимізованої мережі. Значне скорочення довжини кабелю до 22,2397 кілометрів свідчить не лише про кількісний прогрес, а й про якісний стрибок у проектуванні мережі. Аналіз надійності показує, що, незважаючи на те, що топологія *Mesh* є найкращою, оптимізована мережа стратегічно збалансовує надмірність і безпеку, динамічно адаптуючись до втрат зв'язку або збоїв в роботі каналу.

Незважаючи на дещо вищі затримки передачі повідомлень в оптимізованій мережі, ці затримки є прийнятними в контексті зв'язку між базовими станціями. Компромiс між затримкою і загальною ефективністю мережі, досягнутий завдяки оптимізації, позиціонує оптимізовану мережу як універсальне і стратегічне рішення для мереж наземних станцій БПЛА, при цьому являючись явним переможцем по радіозахищеності.

### 3.3. Покращення алгоритму знаходження мінімальних дерев

Як вже було розглянуто, існують 3 основних алгоритми для знаходження мінімальних дерев. Ці алгоритми, відповідно - Борувки, Пріма і Крускала.

Що у них спільного [17]:

- вони знаходять мінімальне остовне дерево (*MST*) у неорієнтованому графі
- вони додають найкоротше ребро до існуючого дерева, доки не буде знайдено *MST*

*MST*

- ці алгоритми жадібні

Важлива відмінність між алгоритмом Борувки та алгоритмом Крускала або Пріма полягає в тому, що з алгоритмом Борувки не потрібно попередньо сортувати краї або підтримувати чергу пріоритетів.

Борувка все ще бере на себе додатковий коефіцієнт  $\log N$  у вартості, але він робить це, вимагаючи проходження  $O(\log N)$  через ребра.

У випадку алгоритму Крускала, перш за все треба відсортувати всі ребра від найдешевших до найдорожчих. Потім на кожному кроці видаляється ребро мінімальної ваги, і якщо воно не створює цикл у графі (який спочатку складається з  $|V|-1$  окремих вершин), тоді воно додається до *MST*. Інакше ми просто видаляємо його.

Алгоритм Борувки шукає найближчого сусіда кожного компонента (спочатку вершини). Процес включає визначення найближчого сусіда для кожної вершини або компонента, надаючи пріоритет ребрам з найнижчими супутніми витратами. Ітеративно додаючи ці ребра до еволюціонуючого *MST*, алгоритм Борувки поступово

з'єднує компоненти. Цей метод продовжується до тих пір, поки весь граф не зійдеться в єдиний з'єднаний компонент, що сигналізує про завершення роботи алгоритму. [12]

Ефективність алгоритму Борувки полягає в його здатності систематично будувати мінімальне остовне дерево, враховуючи близькість та економічність ребер. Такий підхід гарантує, що отримане дерево оптимально покриває заданий граф, пропонуючи цінні застосування в оптимізації мереж, включаючи такі сценарії, як проектування мережі наземних станцій БПЛА.

Знайти найдешевший вихідний край від кожного вузла/компонента легко можна паралельно. Тоді ми можемо просто об'єднати нові отримані компоненти та повторювати фазу пошуку, поки не знайдемо *MST*. Тому цей алгоритм є гарним прикладом паралелізму (у разі знаходження *MST*).

Що стосується паралельної обробки з використанням алгоритму Крускала, нам потрібно зберігати та перевіряти ребра в строгому порядку, тому важко досягти явного паралелізму. Він досить послідовний, і ми не можемо з цим багато чого зробити (навіть якщо ми все ще можемо розглянути, наприклад, паралельне сортування).

Розглянемо проблему, яка існує в створеному алгоритмі. Як і було сказано вище, ми не враховуємо координату  $Z$  при розрахунках. Крім того, наразі алгоритм взагалі не проводить розрахунки відстані, адже ми їх вводимо вручну, а тільки створює мінімальне дерево. Вирішимо це завдяки використанню формули евклідової відстані для об'єктів у  $3D$  просторі.

Евклідова відстань [18] є одним з найбільш використовуваних метрик у аналізі, оскільки вона відповідає інтуїтивним уявленням про близькість і своєю квадратичною формою відповідає класичним статистичним конструкціям.

У математиці евклідова відстань між двома точками в евклідовому просторі - це довжина відрізка між двома точками. Її можна обчислити з декартових координат точок за допомогою теореми Піфагора, тому її іноді називають відстанню Піфагора. Ці назви походять від давньогрецьких математиків Евкліда та Піфагора, хоча Евклід не представляв відстані як числа, а зв'язок від теореми Піфагора з обчисленням відстані не було зроблено до 18 століття.

У трьох вимірах для точок, заданих їх декартовими координатами, відстань обчислюється за допомогою наступної математичної формули:

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2}$$

Як Python функція, ця формула приймає наступний вигляд:

```
def find_length_between_nodes(self, u, v):  
    # Check if the provided node indices are valid  
    if u < 0 or u >= self.m_v or v < 0 or v >= self.m_v:  
        return float('inf') # Return infinity for invalid indices  
  
    # Get the coordinates (x, y, z) of nodes u and v  
    u_coords = self.node_coordinates[u]  
    v_coords = self.node_coordinates[v]  
  
    # Calculate the 3D Euclidean distance between u and v  
    distance = math.sqrt((v_coords[0] - u_coords[0]) ** 2 +  
                          (v_coords[1] - u_coords[1]) ** 2 +  
                          (v_coords[2] - u_coords[2]) ** 2)  
  
    return distance
```

Проблему врахування третьої координати  $Z$  і обчислення відстані між точками в тривимірному просторі було успішно вирішено завдяки використанню формули евклідової відстані. Тепер наш алгоритм може правильно враховувати просторові координати точок та обчислювати відстань між ними, що робить його більш точним та адаптованим до реальних тривимірних просторів.

Для перевірки роботи алгоритму використаємо наступні вхідні тестові дані (табл. 3.3):

Таблиця 3.3

Тестові дані

#	Довгота	Широта	Висота
0	1.0	2.0	3.0
1	4.0	5.0	6.0
2	7.0	6.0	5.0
3	4.0	8.0	9.0
4	7.0	3.0	3.0
5	6.0	8.0	9.0
6	1.0	8.0	2.0
7	2.0	8.0	9.0

Використовуючи оновлений код, підставимо дані із таблиці 3.3 до алгоритму Борувки. Результати роботи алгоритму наведені нижче:

-----*Forming MST*-----

{0: 1, 1: 1, 2: 2, 3: 3, 4: 4, 5: 5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge* [0 - 1]

*Added weight:* 5.196152422706632

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 3, 4: 4, 5: 5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge* [1 - 2]

*Added weight:* 3.3166247903554

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 5, 4: 4, 5: 5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge* [3 - 5]

*Added weight:* 2.0

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 5, 4: 1, 5: 5, 6: 6, 7: 7}

*Added edge [2 - 4]*

*Added weight: 3.605551275463989*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 5, 4: 1, 5: 5, 6: 1, 7: 7}

*Added edge [1 - 6]*

*Added weight: 5.830951894845301*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 5, 4: 1, 5: 5, 6: 1, 7: 5}

*Added edge [3 - 7]*

*Added weight: 2.0*

-----

{0: 1, 1: 1, 2: 1, 3: 1, 4: 1, 5: 1, 6: 1, 7: 1}

*Added edge [1 - 3]*

*Added weight: 4.242640687119285*

=====

*The total weight of the minimal spanning tree is: 26.191921070490608*

### **3.4. Робота з координатами для розрахунку відстаней**

Визначення місцезнаходження на карті — це важливий аспект для розуміння географічного положення об'єктів чи точок і надає можливість здійснювати орієнтацію та навігацію. У звичайних умовах координати використовуються для точного визначення положення на карті.

Процес визначення координат точок місцевості за допомогою карти може залучати використання різних систем координат, таких як географічні, плоскі прямокутні та полярні. Плоскі прямокутні координати надають можливість використовувати прямокутну систему вимірювань для зручності обчислень. Полярні

координати використовують радіус та кут для визначення місцеположення. Географічні координати (рис. 3.3) являють собою кутові величини (широту і довготу), які визначають положення точки на земній поверхні відносно екватора і меридіана, прийнятого за початковий [19].

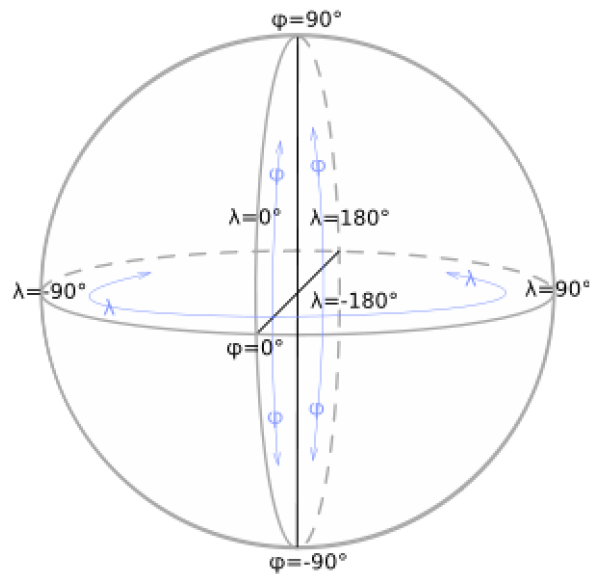


Рис. 3.3. Географічна сфера

Географічна широта - це кутовий вимір, утворений площиною екватора і схилом у будь-якій точці земної поверхні. Цей вимір відіграє вирішальну роль у визначенні положення місця з півночі на південь, залежно від того, чи знаходиться воно вище або нижче екватора. На самому екваторі географічна широта однозначно дорівнює  $0^\circ$ , тоді як на полюсах вона досягає максимального значення  $90^\circ$ .

І навпаки, географічна довгота - це кутовий вимір, утворений площиною початкового меридіана і площиною меридіана, що проходить через задану точку Землі. Щоб зберегти узгодженість у визначенні довготи точок, міжнародний стандарт позначає Гринвіцький меридіан як початковий меридіан. Східна або західна довгота точки визначається, виходячи з її положення відносно початкового меридіана і меридіана  $180^\circ$ .

По суті, географічні широта і довгота служать фундаментальними координатами, які дозволяють точно визначити місцезнаходження на поверхні Землі. У той час як широта позначає положення з півночі на південь, довгота визначає

положення зі сходу на захід, разом вони забезпечують комплексну географічну основу для навігації, картографування та систем глобального позиціонування.

Хоча широта і довгота можуть нагадувати пару координат, подібну до декартової системи координат, ключова відмінність полягає в тому, що географічна система координат не є декартовою [20]. Ця не декартова природа виникає через використання вимірювань кутів, а не координат плоских поверхонь.

Повна специфікація *GCS*, як описано в таких стандартах, як *EPSG* та *ISO 19111*, охоплює більше, ніж просто широту та довготу. Вона включає вибір геодезичної системи координат, що включає такі деталі, як еліпсоїд Землі. Вибір точки відліку має вирішальне значення, оскільки різні точки відліку можуть давати різні значення широти і довготи для одного і того ж географічного місця [21].

Втім, незважаючи на невелике сплюснення на полюсах, Земля по суті зберігає сферичну форму. На сферичній поверхні відстань між двома точками можна описати за допомогою як кутового, так і лінійного вимірювання. Таке перетворення можливе тому, що на сфері з радіусом "*r*" довжина дуги "*L*", яка утворюється при зміні кута на "*A*" градусів, визначається лінією, проведеною з центру сфери до її окружності.

$$L = \frac{2 \pi r A}{360}$$

Оскільки радіус Землі є відомою величиною - 6 371 кілометрів за даними *NASA* [22] – ми можемо безпосередньо перевести *L* в *A* і навпаки.

На сфероїді *GRS 80* або *WGS 84* (рис. 3.4) на рівні моря на екваторі одна широтна секунда простягається на 30,715 метра, широтна хвилина - на 1843 метра, а широтний градус - на 110,6 кілометра. Лінії довготи, відомі як меридіани, сходяться на географічних полюсах, причому ширина однієї довгої секунди природно зменшується зі збільшенням широти. Зокрема, на екваторі на рівні моря довгота секунди становить 30,92 метра, довгота хвилини - 1855 метрів, а довгота градуса - 111,32 кілометра [23]. На широті 30° довгота секунди скорочується до 26,76 метра, у Грінвічі (51°28'38" пн. ш.) вона ще зменшується до 19,22 метра, а на широті 60° стає 15,42 метра.



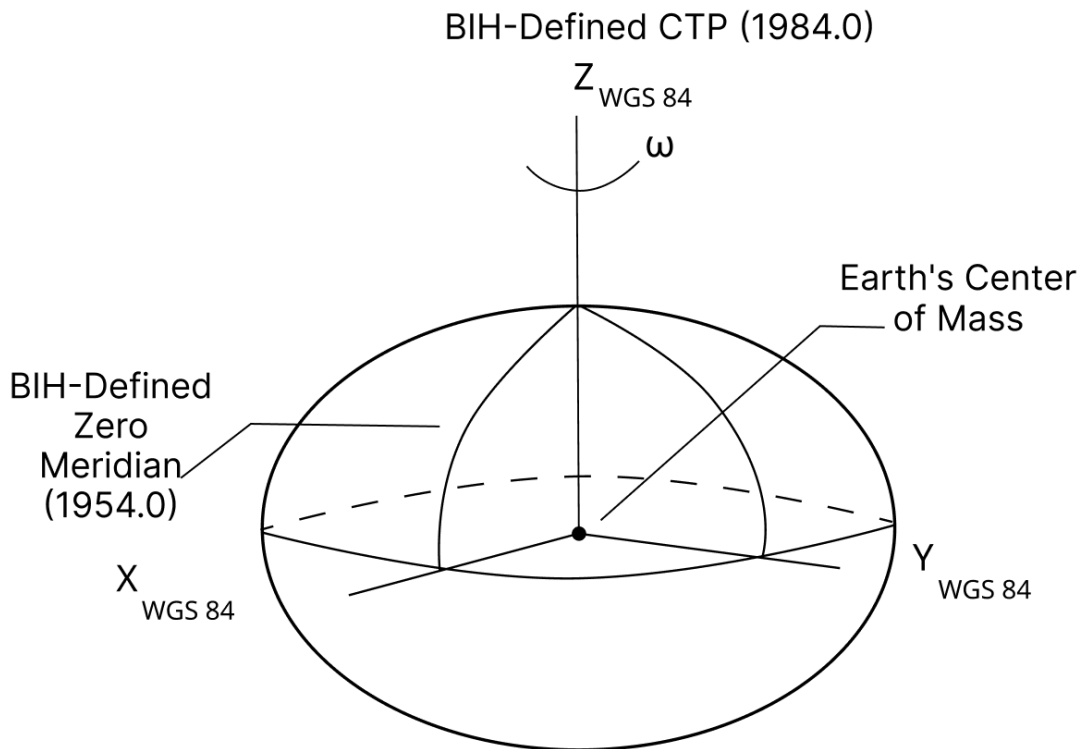


Рис. 3.4. Референц-еліпсоїд WGS 84

Це означає, що обчислення включає кілька кроків, і через те, що воно спирається на лінійну геометрію, в той час як Земля за своєю природою є криволінійною, воно залишається наближенням [24]. Щоб обчислити відстань, необхідно:

1. Відняти меншу широту від більшої, якщо обидва місця знаходяться в Північній або Південній півкулі. Додати широти, якщо місця знаходяться в різних півкулях.
2. Відняти меншу довготу від більшої, якщо обидва місця знаходяться у Східній або Західній півкулі. Додати довготи, якщо місця знаходяться в різних півкулях.
3. Помножити градуси розділення по довготі і широті на 111,139, щоб отримати відповідні лінійні відстані в метрах.

Для більш точного визначення відстані між двома точками на поверхні сфери використовується формула відстані великого кола. Ця формула враховує геодезичну кривизну сферичної поверхні та дозволяє точніше визначати дистанцію між різними точками на географічній сфері:

$$\Delta\sigma = \operatorname{archav}(\operatorname{hav}(\Delta\phi) + (1 - \operatorname{hav}(\Delta\phi) - \operatorname{hav}(\phi_1 + \phi_2)) \operatorname{hav}(\Delta\lambda))$$

$$= 2 \operatorname{arcsin} \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \left(1 - \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)\right) \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}.$$

Для обчислення відстані по великому колу зазвичай використовується бібліотека *geopy Python*. Ця бібліотека полегшує геодезичні розрахунки, надаючи простий спосіб визначення найкоротшої відстані між двома точками на поверхні сфери, наприклад, Землі. Відстань по великому колу є фундаментальною метрикою в геопросторових додатках, пропонуючи точний вимір вздовж кривизни поверхні.

На жаль, спроба обчислити відстані між точками з різною висотою призведе до виключення *ValueError*. Щоб вирішити цю проблему, ми все ще використовуємо формулу евклідової відстані для відповідного наближення, в результаті чого функція обчислення відстані виглядає наступним чином:

```
def find_length_between_nodes(self, u, v):
    if u < 0 or u >= self.m_v or v < 0 or v >= self.m_v:
        return float('inf')

    u_coords = self.node_coordinates[u]
    v_coords = self.node_coordinates[v]

    p1 = (u_coords[0], u_coords[1], u_coords[2])
    p2 = (v_coords[0], v_coords[1], v_coords[2])

    flat_distance = distance.distance(p1[:2], p2[:2]).km
    euclidian_distance = math.sqrt(flat_distance**2 + (p2[2] - p1[2])**2)

    print("p1: ", p1, " | p2: ", p2, " | Dist: ", euclidian_distance)
    return euclidian_distance
```

Зазвичай похибка становить кілька відсотків для точок в Європі, залежно від того, де вони знаходяться і як далеко. Такий результат є прийнятним. Фрагмент

результату прорахунку відстаней, використовуючий географічні координати та висоти, виглядає наступним чином:

$p1: (48.5628, 37.817, 195.0) | p2: (48.4638, 37.8873, 147.0)$

*Dist:* 49.51940017473325

=====

$p1: (48.5628, 37.817, 195.0) | p2: (48.5219, 38.0719, 140.0)$

*Dist:* 58.3090395330961

=====

$p1: (48.5628, 37.817, 195.0) | p2: (48.3971, 37.8115, 152.0)$

*Dist:* 46.78327461575829

=====

$p1: (48.4638, 37.8873, 147.0) | p2: (48.5219, 38.0719, 140.0)$

*Dist:* 16.640391870033504

=====

$p1: (48.4638, 37.8873, 147.0) | p2: (48.3971, 37.8115, 152.0)$

*Dist:* 10.55823734681917

=====

$p1: (48.5219, 38.0719, 140.0) | p2: (48.3971, 37.8115, 152.0)$

*Dist:* 26.599010665046062

### **Висновки за розділом**

У цьому всебічному дослідженні алгоритму Борувки для оптимізації мереж наземних станцій БПЛА очевидна його ефективність у мінімізації довжини кабелів у великих і рідко розподілених мережах. Масштабованість алгоритму забезпечує оптимальні рішення навіть у складних сценаріях, що робить його особливо придатним для наземних станцій БПЛА.

Детальна реалізація коду в класі *Graph* розкриває основні функціональні можливості, демонструючи роботу алгоритму у з'єднанні підграфів та створенні оптимального мінімального остовного дерева. Реальні вимірювання підтверджують

його ефективність, візуально оптимізуючи мережу та покращуючи зв'язність і операційну ефективність.

Аналіз початкових результатів оптимізації підкреслює успіх алгоритму в істотному скороченні загальної довжини кабелів у порівнянні з неоптимізованими топологіями. Хоча топологія *Mesh* перевершує за надійністю мережі, оптимізована мережа досягає збалансованого компромісу між надійністю і радіозахистом. Незважаючи на дещо більші затримки передачі повідомлень, оптимізована мережа залишається прийнятною в контексті зв'язку між базовими станціями та БПЛА.

Таким чином, оптимізована мережа є універсальним рішенням, що забезпечує захист від збоїв, адекватну затримку і явні переваги в плані радіозахисту. Крім того, дослідження вдосконалень алгоритму робить алгоритм Борувки помітним вибором, особливо через притаманний йому паралелізм і ефективність в оптимізації топології мережі.

Крім цього, у розділі розглядаються основні принципи розуміння географічного положення та навігації на картах, підкреслюється важлива роль таких систем координат, як географічні, плоскі прямокутні та полярні. Географічні координати, зокрема широта і довгота, являють собою кутові величини, які визначають положення точки на поверхні Землі, причому широта вказує на положення з півночі на південь, а довгота - на положення зі сходу на захід. Незважаючи на схожість з декартовими координатами, географічна система не є декартовою через те, що покладається на кутові вимірювання.

Специфікація географічної системи координат (*GCS*) виходить за межі широти і довготи, включаючи такі деталі, як еліпсоїд Землі, а вибір точок відліку суттєво впливає на значення координат. Хоча Земля трохи сплюснута на полюсах, її загальна сферична форма дозволяє обчислювати відстані, використовуючи як кутові, так і лінійні вимірювання. У розділі розглядаються особливості сфероїда *WGS 84*, висвітлюється відповідність між секундами широти та лінійними відстанями на екваторі. Обговорення підкреслює кроки, пов'язані з апроксимацією лінійної геометрії, враховуючи кривизну Землі, з формулою відстані по великому колу, яка

пропонує підвищену точність для відстаней на сферичній поверхні, враховуючи геодезичну кривизну.

Розглядаючи відстані між точками з різною висотою, у розділі представлено використання формули евклідової відстані як наближення, що забезпечує комплексну метрику для геопросторових застосувань. Бібліотека *Python geopy* стає цінним інструментом для обчислення відстаней вздовж великого кола на поверхні Землі, спрощуючи геодезичні розрахунки та дозволяючи ефективно визначати відстань між двома точками. Для обчислення відстаней між точками з різною висотою над рівнем моря в розділі представлено формулу евклідової відстані, прикладом якої є функція *find\_length\_between\_nodes* у наведеному фрагменті коду. Ця функція обчислює евклідову відстань, враховуючи як горизонтальні, так і вертикальні перепади, демонструючи практичний підхід для геопросторових застосувань.

Представлені результати підкреслюють прийнятну точність реалізованого підходу, з похибками, як правило, в межах декількох відсотків для точок в Європі. Отримані результати демонструють ефективність формули евклідової відстані та бібліотеки географічних даних для покращення розрахунків відстаней на різних висотах, що сприяє ширшому розумінню геопросторових додатків та навігаційних систем.

## РОЗДІЛ 4

### СТВОРЕННЯ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА

#### 4.1. Вибір технологій для візуалізації даних

Для наочності та відображення результатів нашої оптимізації вирішено створити інтерактивну візуалізацію даних. Візуалізація даних є надзвичайно важливою. Вона слугує критично важливим інструментом для розуміння структури та зв'язності мережі, дозволяючи військовослужбовцям швидко оцінити стан комунікаційної інфраструктури. Використання візуалізації призводить до скорочення часу навчання, покращення розуміння та збільшення запам'ятовування.

За словами доктора Лінелл Бермарк, консультанта з питань освіти, яка пише і говорить про візуальну грамотність: "...якщо наші слова, концепції, ідеї не пов'язані з зображенням, вони увійдуть в одне вухо, пропливуть через мозок і вийдуть через інше вухо. Слова обробляються нашою короткочасною пам'яттю, де ми можемо утримувати лише близько семи біт інформації (плюс-мінус 2). Зображення, з іншого боку, потрапляють безпосередньо в довготривалу пам'ять, де вони закарбовуються назавжди" [26].

Інтерактивна карта дає змогу побачити додані антени та їхні оптимізовані з'єднання, що дозволяє військовим операторам виявити потенційні вразливі місця, оптимізувати шляхи проходження сигналу та забезпечити надійний і безпечний зв'язок у мережі. Така візуалізація може допомогти у прийнятті стратегічних рішень, оперативному плануванні та швидкому реагуванні на будь-які збої або загрози цілісності мережі.

На додаток до демонстрації топології мережі, візуалізація даних включає відображення діапазону кожної антени. Ця функція забезпечує візуальне представлення зони покриття для кожної антени, що дозволяє користувачам оцінити ступінь охоплення сигналу. Розуміння діапазону дії антени має вирішальне значення для забезпечення всебічного покриття всієї операційної зони безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з цих причин:

– Оптимізація покриття. Візуалізуючи діапазони антен, можна оптимізувати їх розміщення для максимального покриття. Це особливо важливо в сценаріях, де БПЛА працюють в різних географічних або оперативних умовах. Візуалізація допомагає виявити прогалини в покритті і стратегічно розмістити антени, щоб мінімізувати мертві зони сигналу.

– Зменшення перешкод. Візуалізація діапазону антен допомагає визначити потенційні зони інтерференції між антенами. Ця інформація є життєво важливою для мінімізації перекриття сигналу та перешкод, забезпечуючи чіткий та надійний канал зв'язку для БПЛА. Стратегічно керуючи розміщенням антен, можна значно знизити ризик погіршення сигналу через перешкоди.

– Розуміння радіусу дії кожної антени полегшує планування резервних шляхів зв'язку. У разі збою або перебоїв в одній частині мережі можна створити резервні шляхи для підтримки безперервного зв'язку з БПЛА. Візуалізація діапазонів антен допомагає визначити оптимальні місця розташування резервних антен для підвищення відмовостійкості мережі.

– Комплексна оцінка ризиків. Включення даних про радіус дії антени у візуалізацію дозволяє провести комплексну оцінку ризиків мережі. Системні адміністратори можуть проаналізувати потенційні вразливі місця в покритті та усунути їх заздалегідь. Такий проактивний підхід підвищує загальну надійність і стійкість комунікаційної інфраструктури, що підтримує наземний сегмент БПЛА.

Для візуалізації даних обрана бібліотека *Folium* разом із бібліотекою *Streamlit*. Вона дозволяє не лише відобразити дані на мапі, але і надає можливість користувачам взаємодіяти з цими даними через веб-додаток.

*Folium*, бібліотека *Python* (рис. 4.1), побудована на *Leaflet.js*, слугує основою для географічного представлення топології мережі. Використовуючи можливості *Folium*, інтерактивна карта динамічно відображає географічне розташування доданих антен, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле та візуально насичене відображення наземного сегменту.



Рис. 4.1. Логотип *Folium*

*Folium* дозволяє легко створювати і відображати карти на веб-сторінках, а також надавати користувачам можливість взаємодіяти з цими картами [27]. *Folium* також надає можливість зберігати створені карти у різних форматах, таких як *HTML*, що можна вбудовувати в веб-сторінки або поділитися з іншими користувачами, що ідеально доповнює необхідний нам функціонал.

Бібліотека *Folium* використовується в різних галузях, включаючи геоінформаційний аналіз, місцезнаходження на мапі, візуалізацію даних для досліджень та навігаційні додатки. Ось деякі засоби та можливості *Folium*, які будуть використовуватись:

- Маркери та попапи: *Folium* дозволяє додавати маркери на мапу, що репрезентують точки із специфічними координатами. Також можна прикріплювати попапи до цих маркерів, щоб відображати інформацію при натисканні на них.

- Лінії та полігони: Дозволяється створювати лінії та полігони, щоб намалювати маршрути, кордони, території або будь-які інші географічні об'єкти.

- Теплові карти: *Folium* підтримує можливість будувати теплові карти для візуалізації інтенсивності подій або ефектів на мапі.

- Векторні та растрові шари: Дозволяється легко додавати векторні та растрові шари на мапу для подальшої аналізу та візуалізації даних.

*Streamlit* легко інтегрується для підвищення інтерактивності візуалізації. Військовослужбовці можуть використовувати зручний інтерфейс *Streamlit* для взаємодії з картою в режимі реального часу, що дозволяє вносити корективи і оцінювати ситуацію "на льоту". Простота інтерфейсу *Streamlit* гарантує, що



користувачі, навіть ті, хто не має глибокої технічної підготовки, зможуть легко орієнтуватися в даних і досліджувати їх.

*Streamlit* - це бібліотека *Python* з відкритим вихідним кодом, призначена для швидкої розробки веб-додатків, зокрема, у сфері науки про дані та машинного навчання (рис. 4.2). Її перевага полягає в тому, що вона дозволяє користувачам, навіть з мінімальним досвідом веб-розробки, без особливих зусиль перетворювати скрипти даних на інтерактивні веб-додатки [28].



Рис. 4.2. Логотип *Streamlit*

Характеризуючись простим і лаконічним синтаксисом *Python*, *Streamlit* сприяє швидкому створенню прототипів. Користувачі можуть перетворити код для аналізу даних у функціональні веб-додатки за допомогою лише кількох рядків коду, що дозволяє їм зосередитися на аналізі даних та логіці додатку, а не на складних деталях веб-розробки.

Важливою особливістю *Streamlit* є підтримка оновлень у режимі реального часу, що робить його придатним для додатків, які потребують динамічного представлення даних у реальному часі. Це особливо корисно для сценаріїв, де основні дані часто змінюються.

*Streamlit* надає ряд вбудованих віджетів, таких як повзунки і кнопки, для підвищення інтерактивності веб-додатків. Ці віджети дають розробникам можливість уможливити взаємодію з користувачем - від налаштування параметрів до запуску певних дій.

Користувачі можуть розгорнути додатки на різних платформах, а *Streamlit Sharing* пропонує можливість безкоштовного хостингу. Крім того, додатки *Streamlit*

можна легко поширювати як окремі веб-адреси, що полегшує спільний доступ без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

## **4.2. Розрахунок радіусу дії антен**

Глибоке розуміння теоретичного діапазону дії антени стає стрижнем для базових станцій БПЛА, виходячи за межі теоретичної сфери і маючи значний вплив на цілий спектр оперативних аспектів. У сфері планування місій тонке розуміння теоретичної дальності дії антени полегшує розробку стратегічних планів. Це дозволяє операторам адаптувати комунікаційні стратегії до цілей місії, враховуючи потенційні зони покриття і обмеження. Ці знання допомагають оптимізувати мережі зв'язку, дозволяючи операторам точно налаштувати параметри для підвищення надійності та продуктивності. Вони допомагають мережевим архітекторам і операторам проектувати і розгортати мережі зв'язку для БПЛА, визначаючи оптимальне розміщення базових станцій і зони покриття. Ефективність розподілу ресурсів є прямим результатом розуміння теоретичного радіусу дії антени. Оцінюючи потенційний радіус дії кожної базової станції, оператори можуть розумно розподіляти ресурси, запобігаючи надмірному використанню в певних зонах і забезпечуючи оптимальний розподіл для задоволення потреб у зв'язку. Операційна гнучкість є невід'ємною частиною знань, які надає теоретична інформація про діапазон антен. Оператори можуть динамічно коригувати стратегії зв'язку відповідно до змін операційного середовища або вимог місії, оптимізуючи продуктивність відповідно до очікуваного радіусу дії антен.

Щоб забезпечити оптимальні послуги зв'язку для технологічно просунутих кінцевих користувачів, мережеві оператори повинні усунути прогалини в покритті або неякісні послуги. Ущільнення базових станцій є критично важливим аспектом процесу планування покриття. Однак цей процес ущільнення не є простим для операторів, враховуючи численні ситуації в навколишньому середовищі і складні параметри, пов'язані з цим процесом. Оператори стикаються з проблемою визначення того, де і як ущільнювати покриття, оптимізуючи при цьому використання ресурсів [29]. Нехтування будь-якими дірками в покритті може не тільки порушити надання

послуг кінцевим користувачам, але й заплямувати репутацію оператора. Отже, усунення прогалин у покритті є обов'язковим, починаючи з етапу розгортання і закінчуючи етапом експлуатації.

Включивши значення потужності передачі (дБм), що є важливою метрикою для розрахунку приблизного радіусу дії антени базової станції за оптимальних умов, ми маємо змогу додати критично важливий вимір до аналізу, особливо при оцінці зони покриття і проектуванні бездротових мереж.

Ключовим аспектом радіотехніки є визначення радіуса антени, процес, що залежить від рівняння втрат у вільному просторі (*FSPL*). Це рівняння має важливе значення в авіагалузі, особливо при проектуванні та оптимізації мереж базових станцій. У сфері телекомунікацій втрати у вільному просторі (*FSPL*) характеризують розсіювання радіоенергії між точками подачі двох антен [30]. Це ослаблення відбувається внаслідок взаємодії між зоною покриття приймальної антени і безперешкодним шляхом прямої видимості у вільному просторі, як правило, в повітрі.

Визначена в рамках антенних термінів як "втрати між двома ізотропними випромінювачами у вільному просторі, виражені як відношення потужностей" [31], *FSPL* відіграє фундаментальну роль у поширенні радіохвиль, дотримуючись оберненого квадратичного закону, що керує розсіюванням хвиль (рис. 4.3). Квадратична залежність між *FSPL* і відстанню між антенами підкреслює картину загасання і водночас обернено корелює з квадратом довжини хвилі радіохвилі.

Важливо зазначити, що хоча *FSPL* рідко використовується ізольовано, її значення підкреслюється, коли вона інтегрована в ширші формули, такі як формула передачі Фріса, яка включає в себе коефіцієнт підсилення антени. У контексті бюджету лінії передачі системи радіозв'язку, включення *FSPL* гарантує, що приймач отримує достатню кількість радіопотужності для чіткого уловлювання сигналу, що передається. По суті, *FSPL* є критично важливим параметром, що полегшує цілісне розуміння поведінки радіосигналу і його впливу на оптимізацію бездротової мережі.

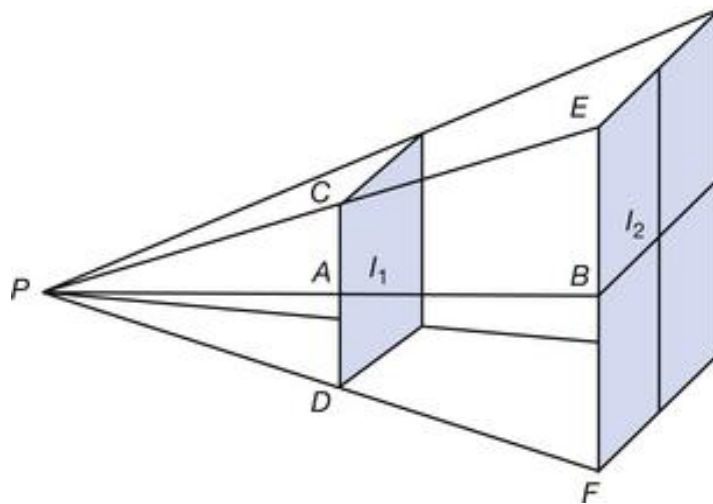


Рис. 4.3. Візуалізація закону оберненого квадрата

Рівняння втрат у вільному просторі (*FSPL*) слугує фундаментальним інструментом у радіотехніці, забезпечуючи кількісну міру загасання сигналу під час його поширення через безперешкодний вільний простір, позбавлений перешкод і віддзеркалень. Цей розрахунок має першорядне значення у сфері бездротового зв'язку, оскільки він відіграє ключову роль у визначенні зони покриття антени і розпізнаванні сили сигналу на різних відстанях від джерела.

Рівняння *FSPL* по суті інкапсулює невід'ємні проблеми, з якими стикаються радіосигнали, коли вони проходять через відкрите повітря. Воно кількісно оцінює розсіювання радіоенергії на відстані - явище, яке регулюється принципами поширення хвиль і природного розсіювання радіохвиль, і розраховується на наведеною нижче математичною формулою:

$$FSPL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + Lc + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) - GTx - GRx$$

Візуалізовані потрібні вхідні параметри для розрахунку теоретичного радіусу дії антени (рис. 4.4):

- Потужність передавальної антени (*Pt*)
- Коефіцієнт підсилення передавальної антени (*Gt*)
- Втрати в кабелі
- Робоча частота
- Чутливість приймача (*Pr*)

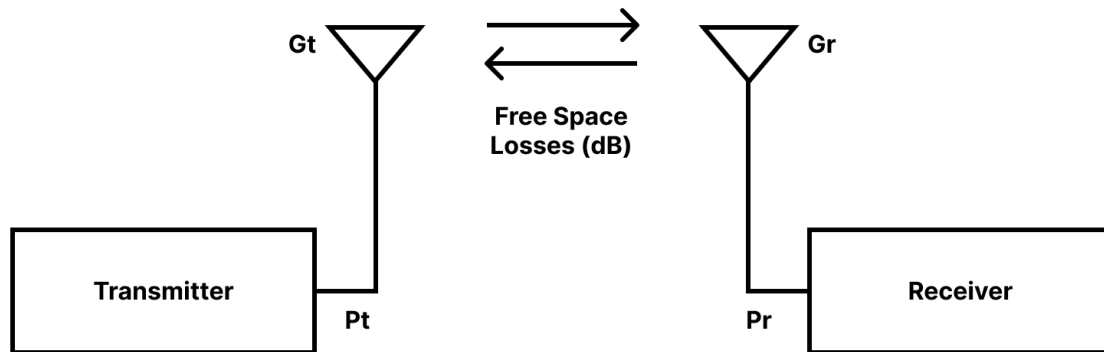


Рис. 4.4. Модель антени

Послідовність розгортається наступним чином:

1. Розрахунок *EIRP*. Перший крок передбачає обчислення еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (*EIRP*). Цей параметр враховує загальну потужність, випромінювану антеною в певному напрямку, беручи до уваги потужність передавача і коефіцієнт підсилення антени. *EIRP* є ключовим показником, який закладає основу для подальших розрахунків.

2. Розрахунок втрат вільного простору. Після визначення *EIRP* наступним кроком є розрахунок втрат у вільному просторі. Ці втрати враховують ослаблення сигналу при його поширенні у вільному просторі, беручи до уваги як передану потужність, так і чутливість приймача. *FSL* є фундаментальною метрикою в розумінні деградації сигналу на відстані.

3. Розрахунок відстані покриття. Відстань покриття розраховується за формулою втрат у вільному просторі (*FSPL*). Ця формула включає раніше розраховані *EIRP* і *FSL*, а також довжину хвилі ( $\lambda$ ). Важливо зазначити, що у формулі *FSPL* довжина хвилі ( $\lambda$ ) виражається як  $c/\text{частота}$ , де  $c$  - швидкість світла ( $3 \times 10^8$ ).

Ці кроки в сукупності формують комплексну методологію для визначення дальності покриття антени, що полегшує системний підхід до радіочастотного планування та оптимізації мережі. У вигляді коду вони виглядають наступним чином:

```
def antenna_range(transmit_gain, transmit_power, frequency, receiver_sens):
    cable_loss = 3
    EIRP = transmit_power - cable_loss + transmit_gain
```

$$FSL = EIRP - receiver\_sens$$
$$Lambda = 3 * pow(10, 8) / frequency$$
$$dist = FSL + 20 * math.log10(Lambda) - 21.98$$

Цей код інкапсулює математичні вирази, що відповідають визначеній методології, пропонуючи практичний і обчислювально ефективний засіб для визначення діапазону покриття антени.

### 4.3. Побудова інтерфейсу користувача

Інтеграція *Folium* і *Streamlit* не тільки полегшує створення динамічних візуалізацій даних, але й забезпечує їх оновлення в режимі реального часу, що робить його безцінним інструментом для військовослужбовців, які беруть участь у динамічних і чутливих до часу операціях. Ця синергія дозволяє миттєво відображати зміни в антенах або конфігураціях в межах візуалізації, надаючи військовим фахівцям найактуальнішу і релевантну інформацію під рукою. Ця функція оновлення стає особливо важливою в сценаріях, де швидке коригування мережі є необхідним. Незалежно від того, чи додаються нові антени, чи змінюються конфігурації, візуалізація динамічно адаптується, пропонуючи живе представлення мережевого ландшафту, що розвивається. Ця можливість дозволяє військовослужбовцям приймати обґрунтовані рішення на основі найновіших даних, що сприяє підвищенню ефективності і результативності їхніх операцій.

Основною метою цієї інтеграції є розробка зручного для користувача інструменту, спеціально призначеного для візуалізації і оптимізації розгортання радіозахищених мереж. Використовуючи географічні дані, такі як широта, довгота, висота і потужність передачі, додаток виходить за рамки звичайних картографічних інструментів. Він перетворює ці дані на комплексну карту мережі, надаючи детальний інтерактивний огляд просторової конфігурації мережі.

Військові користувачі можуть маніпулювати різними параметрами, змінюючи положення антен, рівні потужності передачі та інші конфігурації мережі на льоту. Такий рівень гнучкості дозволяє їм досліджувати різні сценарії розгортання, забезпечуючи оптимальну продуктивність мережі в різних операційних середовищах.

Крім того, інструмент слугує ефективним засобом комунікації між членами команди, дозволяючи їм спільно аналізувати та розробляти стратегії на основі спільного візуального представлення мережі.

Логічна структура додатку складається з наступних основних компонентів (рис. 4.5):

- Клас *Graph* забезпечує реалізацію алгоритму Борувки для оптимізації мережі. Він містить методи обчислення відстані між вузлами, додавання ребер, пошуку компонентів, встановлення компонентів та виконання алгоритму Борувки для визначення мінімального остовного дерева (*MST*).

- Функція *antenna\_range* обчислює діапазон покриття антени на основі коефіцієнта підсилення передавача, потужності, частоти та чутливості приймача.

- Функція *display\_map* використовує *Folium* для створення інтерактивної карти, що відображає розташування базових станцій, з'єднання в *MST* і радіус покриття кожної антени.

- Функція *update\_graph* формує графік з наданих даних про вузли, запускає алгоритм Борувки і повертає кінцевий *MST*.

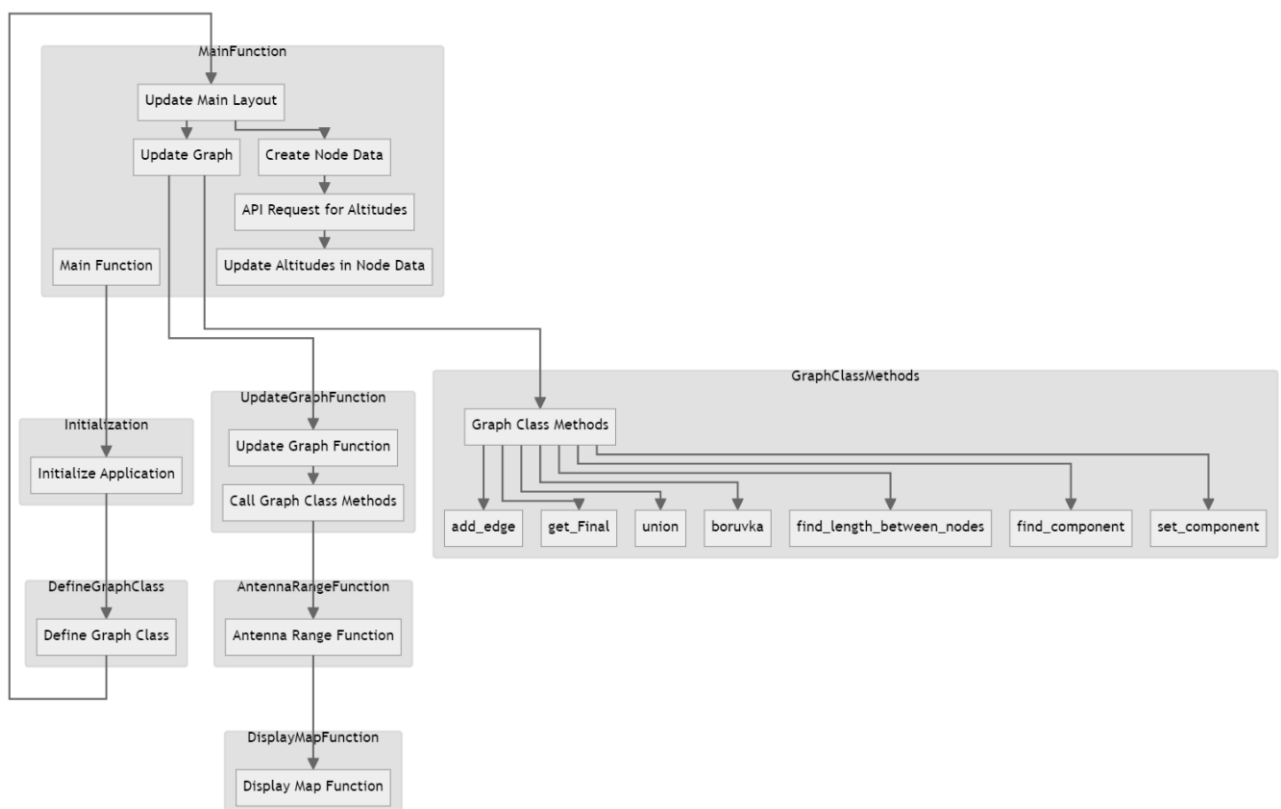


Рис. 4.5. Логічна структура додатку

Інтеграція різних бібліотек *Python* в цей скрипт спрощує процес розробки, роблячи його більш доступним та ефективним. Кожна бібліотека служить певній меті, сприяючи різним аспектам функціональності програми:

- *folium* використовується для створення інтерактивних та візуально привабливих карт. Вона дозволяє інтегрувати географічні дані, що робить її необхідною для візуалізації розташування станцій та мережевого зв'язку;

- *requests* полегшує зв'язок із зовнішніми *API*, такими як *API* висот. Вона відіграє важливу роль в отриманні додаткових даних, таких як інформація про висоту, для підвищення точності візуалізації мережі;

- *pandas* використовується для маніпулювання та презентації даних, *pandas* допомагає керувати та організувати табличні дані, пов'язані з базовими станціями. Він дозволяє безперешкодно обробляти дані, полегшуючи їх оновлення та візуалізацію;

- *math* і *numpy* надають математичні функції, необхідні для різних обчислень у скрипті. Вони допомагають обчислювати відстані, діапазон антени та інші математичні операції;

- *streamlit* та *streamlit\_folium* необхідні для розробки веб-додатків та інтеграції карт *Folium* у *Streamlit*. Вони дозволяють створювати зручний інтерфейс, покращуючи загальний користувацький досвід;

- *geopy* використовується для геокодування та обчислення відстаней. Це розширює можливості скрипту визначати відстані між географічними координатами, що є критично важливим аспектом планування мережі.

Після виконання скрипт налаштовує додаток *Streamlit* з певним макетом і заголовком. Він ініціалізує *DataFrame*, *node\_data*, що містить інформацію про місцезнаходження станції та потужність передачі. Дані про висоту отримуються через зовнішній *API* висот. Додаток надає користувацький інтерфейс для модифікації даних про станції та містить кнопку для запуску оновлення графіка.

Елементом інтерфейсу являється таблиця (рис. 4.6), в яку входять дані про базові станції, щодо яких будується мережа. До цих даних входять:

- координати базової станції (*latitude*, *longitude*, *altitude*);



- назва базової станції;
- параметри антени станції (*transmit power, frequency, transmit antenna gain, receiver sensitivity*).

Station locations															
≡	Latitude	≡	Longitude	≡	Altitude	≡	Name	≡	Transmit	≡	Frequency	≡	Transmit	≡	Receiver sen
	48.6037		37.9758		131		Хромове		50		1,000		2		-120
	48.5715		37.9277		169		Іванівське		33		1,000		2		-120
	48.4679		37.9577		211		Курдюмівка		46		1,000		2		-120
	48.5293		37.9615		156		Кліщіївка		40		1,000		2		-120
	48.5628		37.817		195		Южний		42		1,000		2		-120
	48.4638		37.8873		147		Диліївка		33		1,000		2		-120
	48.5219		38.0719		140		Зайцеве		33		1,000		2		-120
	48.3971		37.8115		152		Щербинівка		33		1,000		2		-120

Рис. 4.6. Вхідні дані до побудови мережі

Елементом інтерфейсу є кнопка з написом "Оновити граф", яка запускає виконання функції *update\_graph*. Ця функція формує графік на основі розташування станцій і запускає алгоритм Борувки для пошуку мінімального остовного дерева (*MST*). Отримане *MST* потім відображається на карті разом з індикаторами потужності антени.

Інтеграція цього коду забезпечує практичний і обчислювально ефективний інструмент для візуалізації та оптимізації розгортання радіо захищених мереж. Він пропонує зручний інтерфейс, що використовує географічні і мережеві дані для прийняття обґрунтованих рішень щодо радіочастотного планування і оптимізації мережі. По суті, користувацький інтерфейс для модифікації даних станцій у поєднанні з кнопкою запуску оновлення графіків створює динамічне і цікаве середовище.

Результуюча карта, що включає положення антен, з'єднання та приблизний радіус дії, візуально зображена на (рис. 4.7), надаючи наочне уявлення про теоретичне покриття мережі.

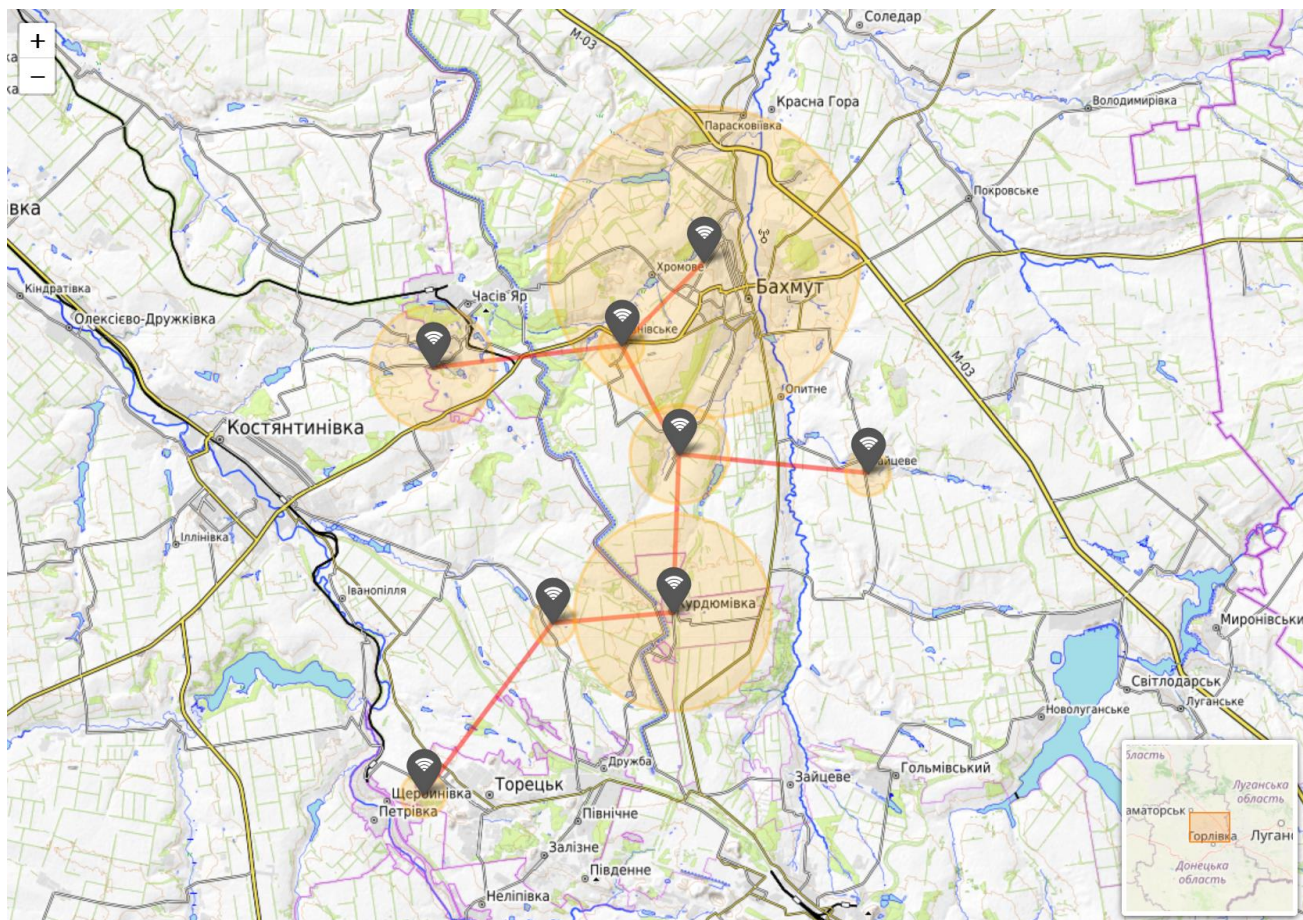


Рис. 4.7. Мапа побудованої мережі

При додаванні даних до таблиці вхідних даних мережа та, відповідно, результуюча мапа, перераховують довжини шляхів і динамічно оновлюються. Наприклад, додамо значення із таблиці 6 до списку базових станцій.

Таблиця 4.1

#### Нові базові станції

<i>Lat.</i>	<i>Long.</i>	<i>Alt.</i>	<i>Name</i>	<i>Pt (dBm)</i>	<i>Freq. (MHz)</i>	<i>Gt (dB)</i>	<i>Pt</i>
48.3267	37.8306	146	Станція 1	40	1000	2	-120
48.3597	38.0038	150	Станція 2	48	1000	2	-120

<i>Lat.</i>	<i>Long.</i>	<i>Alt.</i>	<i>Name</i>	<i>Pt (dBm)</i>	<i>Freq. (MHz)</i>	<i>Gt (dB)</i>	<i>Pt</i>
48.4741	37.7644	189	Станція 3	42	1000	2	-120

Після додавання даних із таблиці (див. табл. 4.1), структура мережі автоматично оновлюється (рис. 4.8)

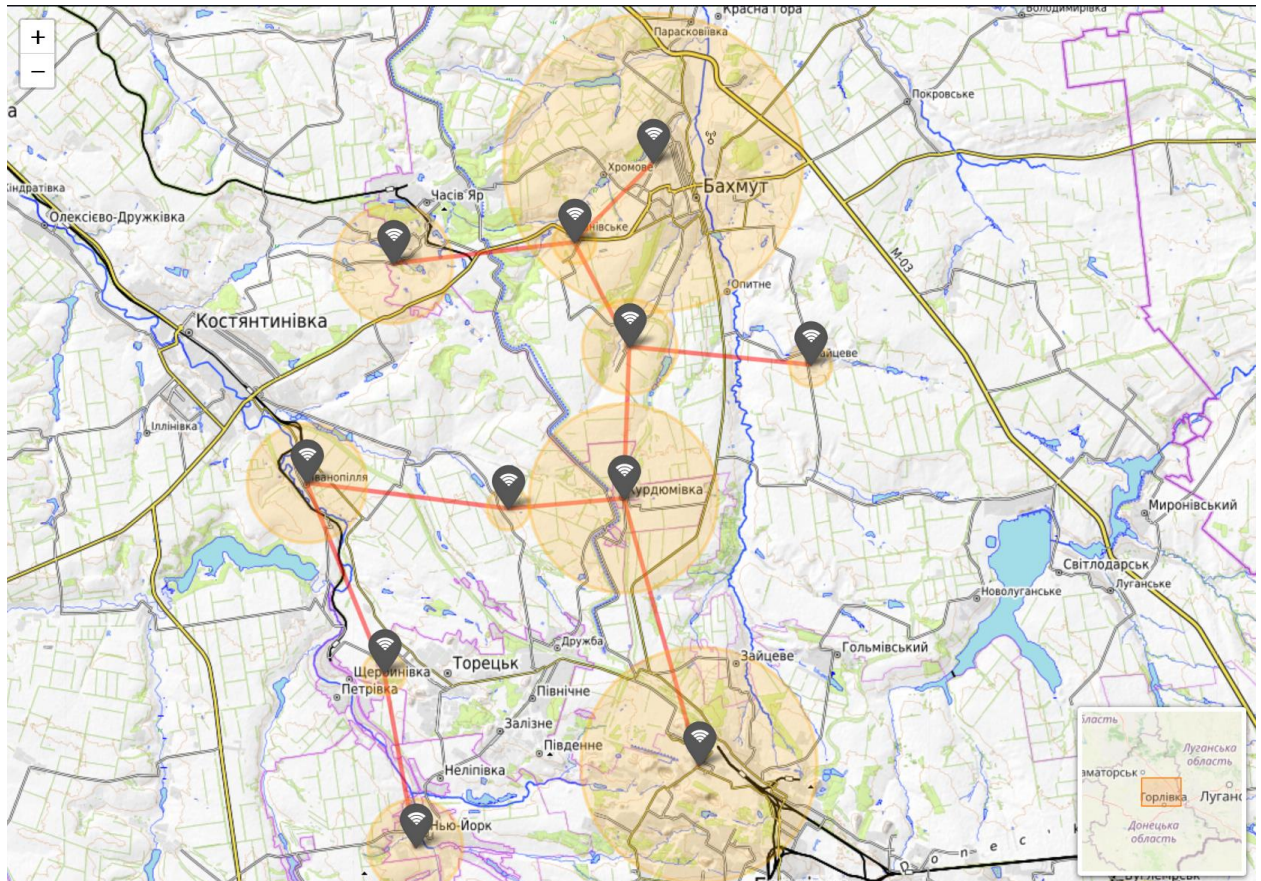


Рис. 4.8. Оновлена мапа мережі

Натиснувши на точку на карті або маркер антени, користувачі можуть легко отримати доступ до координат, пов'язаних з цим конкретним місцем. Ця функціональність покликана спростити процес оновлення даних, позбавляючи користувачів необхідності неодноразово перевіряти або перевіряти інформацію про координати із зовнішніх джерел.

На наступному рисунку (рис. 4.9) інформація про базову станцію або антену стає доступною, якщо просто навести вказівник миші на відповідний маркер на карті. При наведенні курсору миші з'являється швидке та інформативне спливаюче вікно,

що відображає важливі деталі, пов'язані з вибраною антеною. Такі дані можуть включати конкретні атрибути, такі як тип антени, рівень сигналу, робочий стан або будь-яку іншу інформацію, важливу для моніторингу та управління мережею.

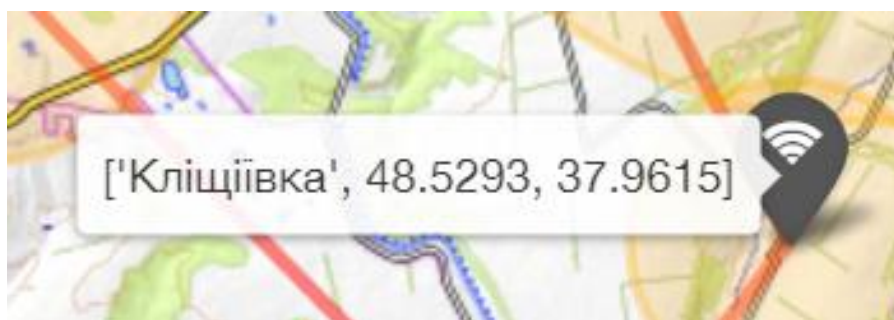


Рис. 4.9. Координати базової станції

Крім того, на наступному рисунку (рис. 4.10) візуально показано вибрану точку на карті. Ця функція покращує взаємодію з користувачем, надаючи чіткий візуальний індикатор обраного місця. Для цілей моніторингу, аналізу або прийняття рішень обрана точка на карті слугує центральною точкою відліку, що дозволяє користувачам точно ідентифікувати та працювати з конкретними елементами мережі наземного сегменту.

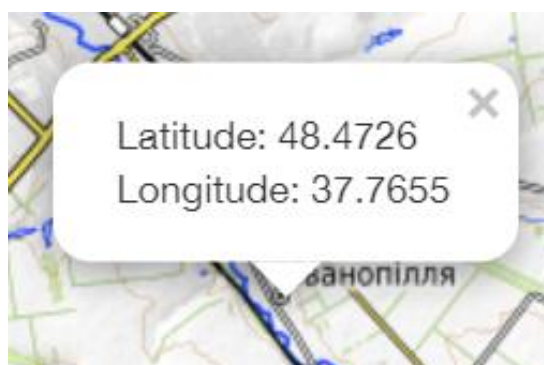


Рис. 4.10. Вибрана точка

Поєднуючи можливість відображення координат при взаємодії з користувачем і надання детальної інформації при наведенні курсору, візуалізація даних не лише забезпечує доступ до критично важливих даних, але й покращує загальний користувацький досвід. Такий інтерактивний підхід дозволяє військовослужбовцям ефективно оновлювати та управляти інформацією, пов'язаною з антенною мережею,

що сприяє покращенню ситуаційної обізнаності та оперативної ефективності в контексті операцій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в наземному сегменті.

Крім цього, додана функція міні-карти, стратегічно розташованої в правому нижньому куті екрану. Ця міні-карта слугує цінним контекстним інструментом, що надає огляд всієї географічної області, охопленої візуалізацією. На наступному рисунку (рис. 4.11) ця функція виділена, демонструючи її роль у покращенні розуміння користувачем обраної території.

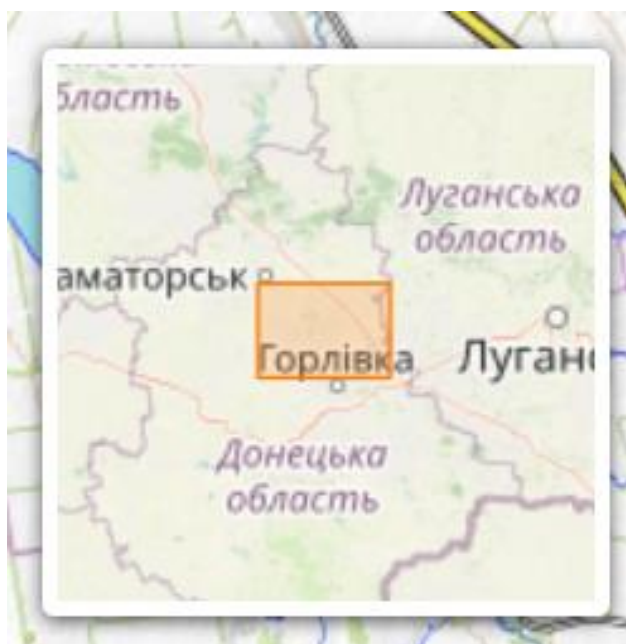


Рис. 4.11. Міні-мапа із виділеною активною областю

Міні-карта пропонує зменшене зображення більшого географічного контексту, що дозволяє користувачам більш ефективно орієнтуватися і розуміти просторовий розподіл антен і елементів мережі. Він забезпечує візуальний орієнтир, допомагаючи користувачам визначити місцезнаходження обраної ділянки в ширшому ландшафті. Це особливо корисно при роботі з розгалуженими або географічно різноманітними наземними мережами, пов'язаними з операціями безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Пропонуючи стислий, але інформативний огляд всієї місцевості, міні-карта допомагає користувачам підтримувати просторову обізнаність і приймати обґрунтовані рішення. Це має вирішальне значення для військовослужбовців, які займаються управлінням і оптимізацією наземної мережі, оскільки дозволяє їм

оцінити взаємне розташування антен і їх просторові взаємозв'язки в рамках ширшого оперативного ландшафту.

Включення міні-карти відповідає основній меті візуалізації даних - надати військовослужбовцям інструменти, які покращують обізнаність про ситуацію і спрощують процес прийняття рішень. Вона є цінним візуальним засобом, що доповнює детальну інформацію, доступну за допомогою інших інтерактивних функцій, і сприяє створенню комплексного і зручного інтерфейсу для ефективного управління радіо захищеною локальною комп'ютерною мережею наземного сегменту БПЛА.

### **Висновки за розділом**

Інтерфейс користувача, створений завдяки гармонійній інтеграції *Folium* і *Streamlit*, є ключовим інструментом для покращення розуміння та управління наземним сегментом мережі для операцій з БПЛА, з особливим акцентом на військове застосування. Цей динамічний і інтерактивний інтерфейс не лише задовольняє унікальні потреби військовослужбовців, а й сприяє зручному користуванню.

*Folium* і *Streamlit* безперешкодно працюють разом, пропонуючи користувачам візуальне представлення топології мережі з оптимізованими з'єднаннями і додатковими антенами. Ефективність інтерфейсу ще більше підкреслюється його здатністю швидко і ефективно створювати топологію мережі. Включення важливих функцій, таких як відображення діапазону антен, додає шар критично важливої інформації, допомагаючи у стратегічному розміщенні антен, зменшенні перешкод і створенні резервних шляхів зв'язку.

Включення інтерактивних елементів, таких як натискання на точки антен для відображення координат і наведення для отримання детальної інформації, значно покращує досвід користувача. Крім того, стратегічно розміщена міні-мапа підвищує контекстну обізнаність, дозволяючи користувачам зрозуміти обрану територію в ширшому оперативному ландшафті. Ця функція є важливим інструментом для забезпечення просторової прив'язки та підтримки прийняття більш обґрунтованих рішень під час операцій з використанням БПЛА.

Теоретичні розрахунки дальності дії антени доповнюють зручний інтерфейс, забезпечуючи надійну методологію для визначення відстані покриття в межах радіо захищеної локальної мережі наземного сегмента БПЛА. Ці розрахунки включають такі фактори, як еквівалентна ізотропна випромінювана потужність (*EIRP*), втрати у вільному просторі (*FSL*) і відстань покриття, визначена за формулою втрат у вільному просторі (*FSPL*). Це досягнення не лише прояснює розрахунки дальності дії антен, але й надає військовослужбовцям практичні інструменти, які можна застосувати в реальних операційних сценаріях.

Поєднуючи теоретичні знання з візуально інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, ця візуалізація дає можливість користувачам приймати обґрунтовані рішення, оптимізувати продуктивність мережі і підвищувати загальну ефективність операцій з використанням безпілотників. Такий синтез теорії і практичного застосування не лише сприяє академічному розумінню, а й надає військовим операціям, що покладаються на безпілотні літальні апарати, ефективні і дієві інструменти.

## ВИСНОВКИ

Всебічне дослідження комп'ютерних мереж виявляє зростаючу залежність, що спонукає до посилення заходів безпеки щодо радіовипромінювання. У розділі 1 детально розглядаються вразливості до хакерських атак і шкідливого програмного забезпечення, особливо в локальних мережах (ЛОМ). Підкреслюючи вплив факторів навколишнього середовища, людського впливу і загроз кібербезпеці, розділ поширюється на військовий контекст, підкреслюючи необхідність захисту від електромагнітних перешкод. В аналізі наголошується на критеріях радіоекранування, ризиках забруднення електромагнітним випромінюванням і вразливості базових станцій БПЛА. Розділ підкреслює важливість високонадійних і захищених каналів управління і зв'язку для ефективного виконання місій БПЛА. Оптимізація розміщення базових станцій стає ключовим завданням, при цьому вирішальну роль відіграють такі фактори, як довжина кабелю, дальність зв'язку, рівень затримки, та масштабованість. Врахування і проактивне управління цими факторами є важливими кроками у підвищенні надійності і безпеки наземних мереж БПЛА, що в кінцевому підсумку зміцнює фундамент для успішного і безпечного виконання місій БПЛА.

Другий розділ заглиблюється в ретельну оцінку фундаментальних мережевих топологій, використовуючи наукову лінзу для ретельного вивчення дихотомії ефективності та надійності, притаманної конфігураціям "зірка" та "сітка". В основі дослідження лежить необхідність досягнення рівноваги між цими найважливішими параметрами, що закладає основу для впровадження алгоритму Борувки як безпрецедентного вибору для оптимізації довжини кабелів у мережах наземних станцій БПЛА.

Топологія "зірка", яку виділяють за її ефективність з точки зору загальної довжини кабелю, піддається критичному аналізу, щоб виявити вразливі місця, пов'язані з надійністю мережі. Ретельний аналіз виявив її вразливість до виходу з ладу однієї базової станції, що може призвести до катастрофічного колапсу всієї мережі. Це відкриття стало каталізатором дослідження альтернативних топологій, які обіцяють підвищену стійкість мережі до відмов окремих вузлів.



На противагу цьому, топологія Mesh постає як надійний конкурент, що може похвалитися підвищеною стійкістю мережі до відмов окремих елементів. Хоча її ефективність у пом'якшенні наслідків одноточкових відмов заслуговує на похвалу, в розділі висвітлюється супутнє зниження рівня радіозахисту, що додає ще один рівень складності до дилеми вибору топології. Визнаючи притаманні топології Mesh переваги, такі як покращена затримка і висока надійність, робота позиціонує її як сприятливу відправну точку для подальших зусиль з оптимізації.

Розділ доповнюється представленням алгоритму Борувки як основного методу мінімізації довжини кабелю в мережах наземних станцій БПЛА. Швидкість та ефективність, з якою алгоритм Борувки встановлює зв'язки між підграфами для створення мінімального остовного дерева, виділяються як визначальні риси, що призводить до відчутного скорочення кількості прокладених кабелів. Ключовий атрибут створення мінімального остовного дерева з меншою кількістю ребер набуває першорядного значення, що легко узгоджується з імперативами зниження витрат і посилення відмовостійкості мережі. Крім того, алгоритм придатний для великих мереж, що характеризуються розрідженим розподілом по периметру, що є характерною особливістю мереж наземних станцій БПЛА. Масштабованість алгоритму Борувки робить його оптимальним рішенням навіть в умовах складної та розгалуженої мережевої архітектури, характерної для наземних станцій БПЛА.

Третій розділ організовує дослідження у сфері розробки дослідницьких інструментів і слугує науковим свідченням досконалості алгоритму Борувки в оптимізаційній парадигмі, характерній для мереж наземних станцій БПЛА. Вимірювання слугують емпіричним доказом, що підтверджує здатність алгоритму скорочувати довжину кабелю. Дослідження виходить за межі алгоритмічної сфери і охоплює глибоке дослідження розуміння географічного розташування, вносячи життєво важливу дозу точності в ландшафт обчислення відстаней. Формула Евклідової відстані, у поєднанні із формулою відстані по великому колу, відіграє ключову роль у цій частині роботи, пропонуючи уточнюючу метрику для геопросторових застосувань до точок з різною висотою над рівнем моря на сферичній поверхні із врахуванням геодезичної кривизни.

Четвертий розділ розглядає створення користувацького інтерфейсу завдяки інтеграції Folium і Streamlit. Інтерфейс розроблений для задоволення потреб військовослужбовців, які беруть участь в операціях з використанням БПЛА і стає візуальним каналом, пропонуючи військовим операторам інтуїтивне уявлення про топологію мережі.

Описані особливості, вбудовані в цей інтерфейс, такі як відображення діапазону антен, щоб запропонувати критично важливу інформацію про просторове покриття. Інтерактивні елементи, характерні для сучасних користувацьких інтерфейсів, дозволяють користувачам уточнювати дані щодо позицій окремих точок на мапі, а додана міні-мапа підвищує контекстну обізнаність, дозволяючи користувачам зрозуміти обрану територію в ширшому оперативному ландшафті. Ця функція є важливим інструментом для забезпечення просторової прив'язки та підтримки прийняття більш обґрунтованих рішень під час операцій з використанням БПЛА.

Поєднання теоретичного розуміння з практичними інструментами завершується пропозицією, яка виходить за межі академічних кіл, маючи можливість безпосередньо впливати на військові операції, що залежать від безпілотних літальних апаратів. Інтерфейс користувача стає вирішальним елементом для військовослужбовців, які беруть участь у динамічних і чутливих до часу операціях, дозволяючи оновлювати дані в режимі реального часу і візуалізувати оптимізовані топології мережі.

Ця робота робить внесок у галузь побудови мереж, пропонуючи системний підхід до оптимізації локальних комп'ютерних мереж в радіо захищених середовищах. Поєднання алгоритмічної оптимізації, візуалізації реальних даних і зручних інтерфейсів робить її цінним ресурсом для військового застосування в динамічних і складних сценаріях.

Наступний етап дослідження рекомендується зосередити на вдосконаленні розрахунків радіусу дії антен шляхом включення даних про рельєф місцевості та апроксимації рельєфу, враховуючи такі фактори, як міське середовище або відкриті поля. Ці вдосконалення не лише обіцяють точніші прогнози покриття, але й підтримують стратегічне планування, пристосоване до конкретних умов експлуатації.

Крім того, інтеграція розробленої програми з реальними системами для оновлення в режимі реального часу додасть динамічного виміру управлінню мережею. Ця інтеграція може передбачати зв'язок додатку з потоками даних в реальному часі, що дозволить військовим отримувати безперервні оновлення про роботу антен у відповідь на зміну умов навколишнього середовища. Підключення в режимі реального часу підвищує значимість роботи, забезпечуючи швидку адаптацію мережі наземних станцій до сценаріїв, що змінюються, і тим самим підвищуючи її ефективність у критичних ситуаціях під час місії.

Цей комплексний підхід враховує складнощі реальних операцій з БПЛА, підкреслюючи адаптивність до різних умов місцевості і здатність реагувати в режимі реального часу як вирішальні елементи успіху місії. Наслідки цих досягнень виходять за межі теоретичних міркувань, забезпечуючи реальний і дієвий інструмент для оптимізації мереж наземних станцій БПЛА в динамічних і складних ландшафтах.

## СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I.; Wisner, B. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters; Routledge: London, UK – 2014.*
2. *OECD Digital Economy Papers, No. 257 Economic and Social Benefits of Internet Openness, OECD Publishing, Paris – 2016*
3. *Military+Aerospace Electronics, Shielding against electromagnetic and RF interference for safety and mission success – 2017. [Електронний ресурс] – Режим доступу:<https://www.militaryaerospace.com/communications/article/16709782/shielding-against-electromagnetic-and-rf-interference-for-safety-and-mission-success>*
4. *C. M. Koo, F. Shahzad, P. Kumar, S. Yu, S. H. Lee, J. P. Hong, Polymer-Based EMI Shielding Materials: Fundamentals, Properties, and Applications, Wiley, New York, United States – 2018*
5. *S. Daniel, S. Thomas, Shielding Efficiency Measuring Methods and Systems. in Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Wiley, New York, United States, 2018.*
6. *B. J. Madhu, Electrical Characterization of Shielding Materials. in Advanced Materials for Electromagnetic Shielding, Wiley, New York, United States – 2018.*
7. *Sýkora, Richard & Babayan, Vladimir & Ušáková, Mariana & Kruželák, Ján & Hudec, Ivan. Rubber composite materials with the effects of electromagnetic shielding. Polymer Composites. – 2015. [Електронний ресурс] – Режим доступу:[https://www.researchgate.net/publication/275673690\\_Rubber\\_composite\\_materials\\_with\\_the\\_effects\\_of\\_electromagnetic\\_shielding](https://www.researchgate.net/publication/275673690_Rubber_composite_materials_with_the_effects_of_electromagnetic_shielding)*
8. *Vladimir Rojansky Electromagnetic Fields and Waves First Edition / Vladimir Rojansky ; Dover Publications, 1979. – 464 с.*
9. *From waste to wealth: A critical review on advanced materials for EMI shielding / Suji Mary Zachariah [та ін.]; Journal of Applied Polymer Science Volume 139, Issue 40, 2022*
10. *A Survey of Electromagnetic Influence on UAVs from an EHV Power Converter Stations and Possible Countermeasures / Li Y [та ін.] // Electronics – 2021 –10(6):701*

11. *Davoli Luca Hybrid LoRa-IEEE 802.11s Opportunistic Mesh Networking for Flexible UAV Swarming / Davoli Luca, Emanuele Pagliari, Gianluigi Ferrari // Drones – 2021 – Issue 5, no. 2.*
12. *IEEE 802.1D Spanning Tree Topology Changes – 2022.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://networkingtales.com/ieee-802-1d-spanning-tree-topology-changes/>
13. *J.Nesetril The Origins of Minimal Spanning Tree Algorithms – Boruvka and Jarník// J.Nesetril, H.Nesetrilova – 2010.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.math.uni-bielefeld.de/documenta/vol-ismmp/30\\_nesetril-nesetrilova.pdf](https://www.math.uni-bielefeld.de/documenta/vol-ismmp/30_nesetril-nesetrilova.pdf)
14. *Helena Durnova Otakar Boruvka (1899-1995) and the Minimum Spanning Tree / Helena Durnova // Mathematik im Wandel. – 2006 – 1. vyd.*
15. *IEEE Spanning Tree Protocols – 2009.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2009/aq-seaman-merged-spanning-tree-protocols-0509.pdf>
16. *Joseph Coffey, Latency in optical fiber systems – 2017.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.commscope.com/globalassets/digizuite/2799-latency-in-optical-fiber-systems-wp-111432-en.pdf>
17. *Sau Sheong Clash of the minimum spanning tree algorithms – 2022.* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://towardsdatascience.com/clash-of-the-minimum-spanning-tree-algorithms-12568d21ca15>
18. Дюран Б. Кластерний аналіз / Б. Дюран, П. Одел.; пер. с англ. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
19. Військова топографія, Визначення координат точки з карти [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://openmap.com.ua/topografia/opredelenie\\_koordinat\\_tochek\\_po\\_karte/](https://openmap.com.ua/topografia/opredelenie_koordinat_tochek_po_karte/)
20. *Kang-tsung Chang, Introduction to Geographic Information Systems - New York: McGraw-Hill Education, 2018*
21. *EPSG Geodetic Parameter Dataset, Understanding the EPSG Geodetic Parameter Dataset, Guidance Note 7-1, 2022* [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://epsg.org/guidance-notes.html>

22. *Facts About Earth: NASA*, 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://science.nasa.gov/earth/facts/>
23. *Nenad M Vusovic, Igor Svrkota, Spatial reference systems: Centre for Evaluation in Education and Science*, 2012
24. *Deziel Chris, How to Convert Distances From Degrees to Meters: sciencing.com*, 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sciencing.com/convert-distances-degrees-meters-7858322.html>
25. *Underground Mathematics, The great circle distance: University of Cambridge*, 2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://undergroundmathematics.org/trigonometry-compound-angles/the-great-circle-distance/download/the-great-circle-distance.pdf>
26. *Burmark, Lynell Visual Literacy: Learn To See, See To Learn: Assn for Supervision & Curriculum*, 2002. – 131 с.
27. *Folium: Discover the open source Python library: DataScientest*, 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://datascientest.com/en/folium-discover-the-open-source-python-library>
28. *Rama Mallavarapu Revolutionizing Data Visualization—Streamlit: A Low-Code Application: Medium*, 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://medium.com/@rama\\_m/revolutionizing-data-visualization-streamlit-a-low-code-platform-7863f51c5c2e](https://medium.com/@rama_m/revolutionizing-data-visualization-streamlit-a-low-code-platform-7863f51c5c2e)
29. *Shahriar Abdullah Al-Ahmed Optimal 3D UAV Base Station Placement by Considering Autonomous Coverage Hole Detection, Wireless Backhaul and User Demand // Shahriar Abdullah Al-Ahmed, Muhammad Zeeshan Shakir, and Syed Ali Raza Zaidi : JOURNAL OF COMMUNICATIONS AND NETWORKS, VOL. 22, NO. 6, 2022*
30. *Radio - Wave Propagation: Simulation of Free Space Propagation Path Loss / Aaron Don M. Africa [та ін.] // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research – 2020. – Volume 8. No. 2*
31. *IEEE Std 145 (Revision of IEEE Std 145-1993). IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas // IEEE – 2014*

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Лістинг коду базового алгоритму Борувки

```
class Graph:
    def __init__(self, num_of_nodes):
        self.m_v = num_of_nodes
        self.m_edges = []
        self.m_component = { }

    def add_edge(self, u, v, weight):
        self.m_edges.append([u, v, weight])

    def find_component(self, u):
        if self.m_component[u] == u:
            return u
        return self.find_component(self.m_component[u])

    def set_component(self, u):
        if self.m_component[u] == u:
            return
        else:
            for k in self.m_component.keys():
                self.m_component[k] = self.find_component(k)

    def union(self, component_size, u, v):
        if component_size[u] <= component_size[v]:
            self.m_component[u] = v
            component_size[v] += component_size[u]
            self.set_component(u)

        elif component_size[u] >= component_size[v]:
            self.m_component[v] = self.find_component(u)
            component_size[u] += component_size[v]
            self.set_component(v)

    print(self.m_component)

def boruvka(self):
    component_size = []
    mst_weight = 0

    minimum_weight_edge = [-1] * self.m_v

    for node in range(self.m_v):
        self.m_component.update({node: node})
        component_size.append(1)
```

```

num_of_components = self.m_v

print("-----Forming MST-----")
while num_of_components > 1:
    for i in range(len(self.m_edges)):

        u = self.m_edges[i][0]
        v = self.m_edges[i][1]
        w = self.m_edges[i][2]

        u_component = self.m_component[u]
        v_component = self.m_component[v]

        if u_component != v_component:
            if minimum_weight_edge[u_component] == -1 or \
                minimum_weight_edge[u_component][2] > w:
                minimum_weight_edge[u_component] = [u, v, w]
            if minimum_weight_edge[v_component] == -1 or \
                minimum_weight_edge[v_component][2] > w:
                minimum_weight_edge[v_component] = [u, v, w]

    for node in range(self.m_v):
        if minimum_weight_edge[node] != -1:
            u = minimum_weight_edge[node][0]
            v = minimum_weight_edge[node][1]
            w = minimum_weight_edge[node][2]

            u_component = self.m_component[u]
            v_component = self.m_component[v]

            if u_component != v_component:
                mst_weight += w
                self.union(component_size, u_component, v_component)
                print("Added edge [" + str(u) + " - "
                    + str(v) + "]\n"
                    + "Added weight: " + str(w) + "\n")
                num_of_components -= 1

        minimum_weight_edge = [-1] * self.m_v
    print("-----")
    print("The total weight of the minimal spanning tree is: " + str(mst_weight))

```

# Forming Graph

```
g = Graph(8)
```

```

g.add_edge(0, 1, 3.1623)
g.add_edge(0, 2, 6.9680)
g.add_edge(0, 3, 3.8079)
g.add_edge(0, 4, 7.7451)
g.add_edge(0, 5, 7.3824)
g.add_edge(0, 6, 5.0249)
g.add_edge(0, 7, 4.7434)

```



```
g.add_edge(1, 2, 4.2720)
g.add_edge(1, 3, 2.5593)
g.add_edge(1, 4, 6.3855)
g.add_edge(1, 5, 7.5166)
g.add_edge(1, 6, 6.5000)
g.add_edge(1, 7, 7.1063)
```

```
g.add_edge(2, 3, 3.5920)
g.add_edge(2, 4, 3.9740)
g.add_edge(2, 5, 6.9298)
g.add_edge(2, 6, 7.8646)
g.add_edge(2, 7, 9.3532)
```

```
g.add_edge(3, 4, 4.0943)
g.add_edge(3, 5, 5.0100)
g.add_edge(3, 6, 4.6098)
g.add_edge(3, 7, 5.8207)
```

```
g.add_edge(4, 5, 3.5364)
g.add_edge(4, 6, 5.8886)
g.add_edge(4, 7, 7.8604)
```

```
g.add_edge(5, 6, 3.3541)
g.add_edge(5, 7, 5.3926)
```

```
g.add_edge(6, 7, 2.0616)
```

```
# Running algorythm
g.boruvka()
```

## Додаток Б

### Лістинг коду веб-додатку оптимізації топології захищеної від радіовипромінювання ЛОМ

```
import folium
import requests
import pandas as pd
import math
import numpy as np
import streamlit as st
from streamlit_folium import st_folium
from folium import plugins
import warnings
from geopy import distance

warnings.filterwarnings('ignore')

APP_TITLE = 'Радіозахищена ЛОМ для БАК'
APP_SUBTITLE = 'Підгайний О.А.'

# =====

class Graph:
    def __init__(self, num_of_nodes):
        self.m_v = num_of_nodes
        self.m_edges = []
        self.m_component = {}
        self.final_path = []

    def get_Final(self):
        print("Final: ", self.final_path)
        return(self.final_path)

    def find_length_between_nodes(self, u, v):
        if u < 0 or u >= self.m_v or v < 0 or v >= self.m_v:
            return float('inf')

        u_coords = self.node_coordinates[u]
        v_coords = self.node_coordinates[v]

        p1 = (u_coords[0], u_coords[1], u_coords[2]/1000)
        p2 = (v_coords[0], v_coords[1], v_coords[2]/1000)

        flat_distance = distance.distance(p1[:2], p2[:2]).km
        euclidian_distance = math.sqrt(flat_distance**2 + (p2[2] - p1[2])**2)

        #print("p1: ", p1, " | p2: ", p2, " | Dist: ", euclidian_distance)

        return euclidian_distance

    def add_edge(self, u, v):
```

```

weight = self.find_length_between_nodes(u, v)
self.m_edges.append([u, v, weight])

def find_component(self, u):
    if self.m_component[u] == u:
        return u
    return self.find_component(self.m_component[u])

def set_component(self, u):
    if self.m_component[u] == u:
        return
    else:
        for k in self.m_component.keys():
            self.m_component[k] = self.find_component(k)

def union(self, component_size, u, v):
    if component_size[u] <= component_size[v]:
        self.m_component[u] = v
        component_size[v] += component_size[u]
        self.set_component(u)

    elif component_size[u] >= component_size[v]:
        self.m_component[v] = self.find_component(u)
        component_size[u] += component_size[v]
        self.set_component(v)

def boruvka(self):
    component_size = []
    mst_weight = 0

    minimum_weight_edge = [-1] * self.m_v

    for node in range(self.m_v):
        self.m_component.update({node: node})
        component_size.append(1)

    num_of_components = self.m_v

    while num_of_components > 1:
        current_path = []

        for i in range(len(self.m_edges)):
            u = self.m_edges[i][0]
            v = self.m_edges[i][1]
            w = self.m_edges[i][2]

            u_component = self.m_component[u]
            v_component = self.m_component[v]

            if u_component != v_component:
                if minimum_weight_edge[u_component] == -1 or \
                    minimum_weight_edge[u_component][2] > w:

```

```

        minimum_weight_edge[u_component] = [u, v, w]
    if minimum_weight_edge[v_component] == -1 or \
        minimum_weight_edge[v_component][2] > w:
        minimum_weight_edge[v_component] = [u, v, w]

```

```

for node in range(self.m_v):
    if minimum_weight_edge[node] != -1:
        u = minimum_weight_edge[node][0]
        v = minimum_weight_edge[node][1]
        w = minimum_weight_edge[node][2]

        u_component = self.m_component[u]
        v_component = self.m_component[v]

        if u_component != v_component:
            current_path = ([u, v, w])
            mst_weight += w
            self.union(component_size, u_component, v_component)
            self.final_path.append(current_path)
            num_of_components -= 1

```

```

    minimum_weight_edge = [-1] * self.m_v

```

```

# =====

```

```

def antenna_range(transmit_gain, transmit_power, frequency, receiver_sens):

```

```

    cable_loss = 3
    EIRP = transmit_power - cable_loss + transmit_gain
    FSL = EIRP - receiver_sens
    Lambda = 3 * pow(10, 8) / frequency
    dist = FSL + 20 * math.log10(Lambda) - 21.98

```

```

    return pow(10, (dist/20)) / 1000000

```

```

# =====

```

```

def main():
    st.set_page_config(APP_TITLE, layout='wide')
    st.title(APP_TITLE)
    st.caption(APP_SUBTITLE)

```

```

# =====

```

```

def display_map(node_data, MST):

```

```

    m = folium.Map(center=[node_data.iloc[0]['Latitude'], node_data.iloc[0]['Longitude']],
        attr = ('&copy;', <a href="https://www.openstreetmap.org/copyright">OpenStreetMap</a> '
        'contributors, &copy;', <a href="https://cartodb.com/attributions">CartoDB</a>'),

```

```

tiles='https://{s}.tile.opentopomap.org/{z}/{x}/{y}.png')

# plugins
minimap = plugins.MiniMap()
m.add_child(minimap)

# add marker one by one on the map
for i in range(0,len(node_data)):
    folium.Marker(
        location=[node_data.iloc[i]['Latitude'], node_data.iloc[i]['Longitude']],
        tooltip=[node_data.iloc[i]['Name'], node_data.iloc[i]['Latitude'],
node_data.iloc[i]['Longitude']],
        icon=folium.Icon(color="gray", icon="wifi", prefix='fa')
    ).add_to(m)

# adding lines to the map
for i in range(len(MST)):
    del(MST[i][2])

line_coords = []

for i in (MST):
    a = [ [node_data.iloc[i[0]]['Latitude'], node_data.iloc[i[0]]['Longitude']],
        [node_data.iloc[i[1]]['Latitude'], node_data.iloc[i[1]]['Longitude']] ]
    line_coords.append(a)

folium.PolyLine(line_coords, color='red', opacity='50%', weight=4).add_to(m)

# adding antenna strenght
for i in range(0,len(node_data)):
    folium.Circle(
        location=[node_data.iloc[i]['Latitude'], node_data.iloc[i]['Longitude']],
        tooltip=[node_data.iloc[i]['Name'], node_data.iloc[i]['Latitude'],
node_data.iloc[i]['Longitude']],

        radius = antenna_range( node_data.iloc[i]['Transmit Antenna Gain (dB)'],
                                node_data.iloc[i]['Transmit Power (dBm)'],
                                node_data.iloc[i]['Frequency (MHz)'],
                                node_data.iloc[i]['Receiver sensitivity'] ) / 1000,

        fill='true',
        opacity=0.3,
        color='orange'
    ).add_to(m)

m.add_child(folium.LatLngPopup())

```

```

# show map
st_folium(m, width='100%', height=800, zoom=5)

# =====

def update_graph(node_data):

    # Forming Graph
    n = len(node_data)
    g = Graph(n)

    g.node_coordinates = {
        i: (node_data.iloc[i]['Latitude'], node_data.iloc[i]['Longitude'], node_data.iloc[i]['Altitude'])
        for i in range(len(node_data))
    }

    for i in range(n):
        for j in range(i + 1, n):
            g.add_edge(i, j)

    # Running algorithm
    g.boruvka()
    return(g.get_Final())

# =====

if __name__ == "__main__":

    print("Updating")
    main()

    node_data = pd.DataFrame({
        'Latitude':[48.6037, 48.5715, 48.4679, 48.5293, 48.5628, 48.4638, 48.5219, 48.3971 ],
        'Longitude':[37.9758, 37.9277, 37.9577, 37.9615, 37.8170, 37.8873, 38.0719, 37.8115],
        '#Altitude':[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
        'Name':['Хромове', 'Іванівське', 'Курдюмівка', 'Кліщіївка', 'Южний', 'Диліївка', 'Зайцеве',
'Щербинівка'],
        'Transmit Power (dBm)':[50, 33, 46, 40, 42, 33, 33, 33],
        'Frequency (MHz)':[1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000],
        'Transmit Antenna Gain (dB)':[2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2],
        'Receiver sensitivity':[-120, -120, -120, -120, -120, -120, -120, -120],
    }, dtype=object)

    # Get altitudes via API

    alt_request = requests.get("https://api.open-meteo.com/v1/elevation?latitude=" +
str(list(node_data["Latitude"])).strip('[]').replace(' ', '') + "&longitude=" +
str(list(node_data["Longitude"])).strip('[]').replace(' ', ''))

```

```

alt_data = alt_request.strip("{}").replace("'", "").replace("elevation:", "").strip("[]")
alt_data = np.fromstring(alt_data, dtype=float, sep=', ')

node_data.insert(2, 'Altitude', alt_data)

# Antennas table

st.write("Station locations")
data = st.data_editor(node_data, num_rows="dynamic")

# Button

if 'clicked' not in st.session_state:
    st.session_state.clicked = {1:False}

# Function to update the value in session state
def clicked(button):
    st.session_state.clicked[button] = True

if st.button("Update Graph", on_click=clicked, args=[1]):
    update_graph(data)

# DISPLAY
if st.session_state.clicked[1]:
    display_map(data, update_graph(data))

```