

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод автоюстування антен вузлів FANET-мережі  
при передачі Big Data

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-20-2  
Кривобоков Ю.А.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент Ткачов В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Волк М.О.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Системне програмування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту \_\_\_\_\_ Кривобокову Юрію Андрійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод автоюстування антен вузлів FANET-мережі при передачі Big Data

затверджена наказом по університету від “ 24 ” березня 2022 р. № 413 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 травня 2022 р.

3. Вхідні дані до роботи - робоча станція (CPU: OctalCore AMD Ryzen 7 5800H,

3.2-4.4 ГГц, тип RAM: DDR4, частота RAM 3200 МГц, об'єм ОЗУ: 32 ГБ,

об'єм 1 SSD: 1 ТБ, об'єм 2 SDD: 2 ТБ, модель відеокарти: nVidia GeForce RTX 3060).;

- мережний комутатор TP-Link AX1800 – 1 шт.;

- браузер Google Chrome (версія 100.0.4896.127 (розробка) 64-біт)

- програмне забезпечення (Visual Studio Code, Three.js, WebGL, ReactJS, Webpack, Babel та інше).

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

Вступ.

Розділ 1. Аналіз предметної області.

Розділ 2. Програмні рішення.

Розділ 3. Метод автоюстування.

Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 13 слайдів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення з темою роботи	30.03.22-05.04.22	
2	Пошук літератури	06.04.22-14.04.22	
3	Аналіз відомих методів	15.04.22-22.04.22	
4	Розробка власного методу	23.04.22-29.04.22	
5	Аналіз результатів застосування методу	30.04.22-03.05.22	
6	Робота над програмною частиною	04.05-22-07.05.22	
7	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	08.05.22-11.05.22	
8	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	12.05.22-13.05.22	
9	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	14.05.22-15.05.22	

Дата видачі завдання 28 березня 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доцент Ткачов В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 83 с., 34 рис., 2 дод., 65 джерел.

АВТОЮСТУВАННЯ, ОБ'ЄКТИ FANET-МЕРЕЖІ, MANET, VANET, BIG DATA, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, THREE.JS, БПЛА, КВАТЕРНІОНИ, ПРОЦЕДУРНА ГЕНЕРАЦІЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності або досягнення гарантованої передачі даних між об'єктами мережі FANET шляхом збільшення шансу передачі даних на основі підходу 3D-моделювання з використанням тривимірного вектора, довжина якого завжди буде дорівнювати евклідовій відстані.

У ході виконання кваліфікаційної роботи необхідно проаналізувати предметну область, виявити проблеми, проаналізувати існуючі програмні рішення, їх недоліки, припустити і розробити математичну модель та прототип методу рішення, отримати результати, зробити висновки. Підхід 3D-моделювання, заснований на евклідовому просторі та проекції з використанням кватерніонів на процедурно сформованій поверхні, дозволяє точно бачити і обчислювати область обміну, де буде відбуватися гарантована передача даних між об'єктами мережі FANET. Процедурна генерація надає можливість створювати реальні умови моделювання (погода, рельєф, будівлі тощо), які впливають на затримку та перешкоди у передачі даних. Зроблено висновок що існуючі програмні засоби для дослідження, аналізу і проектування є низькорівневими, комерційними, позбавлені деяких спеціалізованих лінгвістичних та програмних засобів для опису структурних особливостей комп'ютерних мереж та функціонування вузлів і для збирання статистичних даних, які могли б визначити продуктивність.

## ABSTRACT

Master's thesis: 83 pages, 34 figures, 2 appendices, 65 sources.

AUTO ADJUSTMENT, FANET NETWORKS, MANET, VANET, BIG DATA, DATA TRANSMISSION, THREE.JS, UAVS, QUATERNIONS, PROCEDURAL GENERATION.

The major goal of this thesis is increase efficiency or achieve guaranteed data transfer between FANET objects by increasing the chance of data transfer based on the 3D modeling approach using a three-dimensional vector, the length of which will always be equal to the Euclidean distance

During the qualification work it is necessary to analyze the subject area, identify problems, analyze existing software solutions, their shortcomings, assume and develop a mathematical model and prototype of the solution method, get results, draw conclusions. The 3D modeling approach, based on Euclidean space and projections using quaternions on a procedurally formed surface, allows to accurately see and calculate the area of exchange where guaranteed data transfer between FANET objects will take place. Procedural generation provides an opportunity to create real simulation conditions (weather, terrain, buildings, etc.) that affect the delay and interference in data transmission. It is concluded that the existing software for research, analysis and design are low-level, commercial, devoid of some specialized linguistic and software tools to describe the structural features of computer networks and nodes and to collect statistics that could determine performance.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ .....	11
1.1 Загальні відомості .....	11
1.2 Моделі мобільності .....	13
1.2.1 Моделі випадкової мобільності .....	14
1.2.2 Моделі мобільності, що залежать від часу .....	14
1.2.3 Моделі мобільності з планування шляху .....	15
1.2.4 Моделі групової мобільності .....	16
1.2.5 Моделі гібридної мобільності.....	17
1.3 Протоколи для покриття.....	17
1.3.1 Позиціонування на основі висоти .....	18
1.3.2 Позиціонування на основі мереж .....	19
1.3.3 Оцінка продуктивності протоколів .....	20
1.4 Алгоритми маршрутизації.....	21
1.5 Моделі розповсюдження .....	22
1.5.1 Теоретичні моделі розповсюдження .....	23
1.5.2 Емпіричні моделі розповсюдження .....	24
1.5.3 Напівемпіричні моделі розповсюдження .....	24
1.6 Практичні результати .....	25
2 ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ .....	32
2.1 4NEC2.....	32
2.1 Cisco Packet Tracer.....	35
3 МЕТОД АВТОЮСТУВАННЯ.....	37
3.1 Загальна інформація про Three.js .....	37
3.2 Модель взаємодії.....	38

3.3 Блок-схема роботи .....	46
3.4 Основні моменти створення програми .....	50
3.4.1 Встановлення необхідних залежностей.....	50
3.4.2 Перший етап реалізації.....	53
3.4.3 Другий етап реалізації .....	56
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	66
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	77
ДОДАТОК Б Загальна блок-схема роботи алгоритму .....	83

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ДН – діаграма спрямованості

КСХ – коефіцієнт стоячої хвили

AAA – система аутентифікації, авторизації та обліку подій (англ., Authentication, Authorization and Accounting)

AODV – протокол динамічної маршрутизації для мобільних Ad hoc мереж та інших бездротових мереж (англ., Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing)

APAR – протокол оцінки поглиненої фотосинтетично активної радіації (англ., Absorbed Photosynthetically Active Radiation)

BGP – протокол граничного шлюха (англ., Border Gateway Protocol)

CE-OLSR – протокол маршрутизації, оптимізований для мобільних однорангових мереж, які також можуть бути використані на інших бездротових однорангових мережах (англ., Optimized Link State Routing Protocol)

CST – протокол кістякового дерева (англ., Spanning Tree Protocol)

DNCP – протокол динамічної конфігурації вузла (англ., Dynamic Host Configuration Protocol)

DNS – система доменних імен (англ., Domain Name System)

DPI – кількість точок на дюйм (англ., Dots per inch)

DSDV – маршрутизація з вектором слідування та послідовністю призначення (англ., Destination-Sequenced Distance-Vector Routing)

DSR – динамічна маршрутизація від джерела (англ., Dynamic Source Routing)

EIGRP – розширений протокол маршрутизації вектора відстані на основі принципів протоколу маршрутизації внутрішніх шлюзів (англ., Enhanced Interior GateWay Routing Protocol)

- FANET – літаючі бездротові мережі (англ., Flying Ad Hoc Network)
- FTP – протокол передавання файлів (англ., File Transfer Protocol)
- GNU – графічний інтерфейс користувача (англ., Graphical user interface)
- GREVPN – різновид приватних віртуальних мереж (тунель), загальна інкапсуляція маршрутизації (англ., Generic Routing Encapsulation)
- HTTP – протокол передачі даних (англ., HyperText Transfer Protocol)
- HWMP – протокол гібридної бездротової мережі (англ., Hybrid Wireless Mesh Protocol)
- ICMP – міжмережевий протокол керуючих повідомлень (англ., Internet Control Message Protocol)
- IPSecVPN – набір протоколів для захисту даних, що передаються по міжмережевому протоколу IP (англ., IP Security for Virtual Private Network)
- MANET – бездротова, децентралізована, мобільна IP-мережа, що здатна до самоорганізації та забезпечує встановлення з'єднань між довільними вузлами (англ., Mobile Ad hoc Network)
- NAT – перетворення мережевих адрес (англ., Network Address Translation)
- NTP – мережевий протокол часу (англ., Network Time Protocol)
- POP3 – протокол для отримання електронної пошти (англ., Post Office Protocol Version 3)
- RTP – протокол передачі даних в реальному часі (англ., Real-time Transport Protocol)
- SLERP – сферична лінійна інтерполяція (англ., Spherical Linear intERPolation)
- SMTP – простий протокол пересилання пошти (англ., Simple Mail Transfer Protocol)
- SNMP – простий протокол керування мережею (англ., Simple Network Management Protocol)
- VANET – бездротова, децентралізована, мобільна мережа, яка здатна до самоорганізації (англ., Vehicular Ad hoc NETWORKS)

## ВСТУП

Поява літаючих однорангових мереж відкрило нові можливості. Ці мережі мають спільні риси зі своїми попередниками, наприклад, з мобільними одноранговими мережами та автомобільними одноранговими мережами. Проте є кілька унікальних характеристик, які відрізняють FANET. Ці відмінні риси накладають ряд рекомендацій, які необхідно враховувати для успішного розгортання. Зокрема, використання FANET для телекомунікаційних послуг, пов'язане із серйозними проблемами з точки зору якості обслуговування, енергоефективності, масштабованості та адаптованості. Належне використання моделей у дослідницькій діяльності, безперечно, допоможе вирішити ці проблеми. Загальним обмеженням є відсутність досліджень, що оцінюють вплив, який безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть чинити на бортові/вбудовані пристрої зв'язку, зазвичай, просто припускаючи ізотропні або всеспрямовані діаграми спрямованості. Тому необхідно досліджувати і враховувати діаграму спрямованості пристрою 802.11 n/ac (WiFi), вбудованого в БПЛА, що працює в діапазонах 2,4 і 5 ГГц.

БПЛА, також відомі як дрони, були прийняті в багатьох секторах, таких як сільське господарство, моніторинг лісових пожеж, спостереження за кордоном або телекомунікації.

Прості таксономії використовують для класифікації БПЛА, наприклад, за типом польоту (автономний або дистанційно керований), їх розміром (великий або маленький), типом крил або їх комунікаційним можливостям. Що стосується типів крил, то існує дві основні категорії: з нерухомим крилом та з гвинтокрилом. У той час як перші мають більш тривалий час польоту, більш високі швидкості польоту та більш аеродинамічну конструкцію, другі здатні виконувати вертикальний зліт та посадку, демонструють більшу стійкість (можуть контролювати нишпорення, тангаж, крен та дросель).

Що стосується комунікаційних можливостей, розрізняють одиночні БПЛА, які зазвичай використовують зіркоподібну топологію для зв'язку з базовою станцією або супутником [1] та багатоблочні системи [2]. В даний час більшість цивільних та військових об'єктів реалізується з використанням систем з декількома БПЛА, що складаються з рою чи групи невеликих БПЛА. Цей підхід дає кілька переваг, таких як менший час для виконання завдань, зниження витрат, більш висока масштабованість і більша надійність.

FANET можливо роздивлятися як підмножину концепції мобільних однорангових мереж (MANET). MANET — це мережі, що складаються з мобільних пристроїв, таких як ноутбуки, стільникові телефони, датчики і так далі. Подібно до автомобільних однорангових мереж (VANET), компонентами яких є автомобілі, автобуси, машини швидкої допомоги тощо, включаючи вбудовані пристрої зв'язку, у FANET БПЛА є з'єднані бездротовим способом або безпосередньо або з використанням проміжних вузлів. Незважаючи на те, що FANET мають спільні риси з MANET та VANET, існує кілька унікальних характеристик, які відрізняють їх, а саме мобільність, зміни топології, поширення радіохвиль та енергетичні обмеження.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Загальні відомості

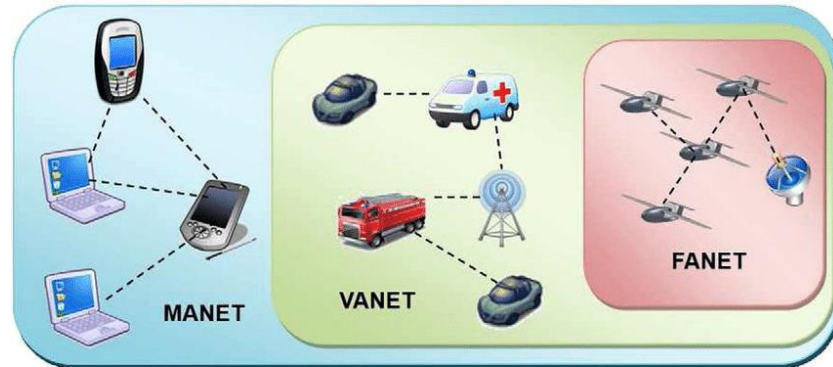


Рисунок 1.1 – Діаграма порівняння FANET, VANET, MANET

У FANET мобільність вузлів зазвичай більше, ніж у VANET та MANET. Швидкість вузлів сильно варіюється: від статичності при повітряному покритті або ретрансляційних мережевих вузлах до польоту на повній швидкості в пошуково-рятувальних задачах. Ці вузли мають можливість переміщатися в трьох просторових вимірах з повним вільним рухом, а БПЛА з гвинтокрилом можуть незалежно обертатися по трьох осях. У MANET вузли зазвичай мають дуже низьку мобільність [3] і обмежені зміною швидкості. У VANET вузли відповідають транспортним засобам, що рухаються по вулицям, представляючи зміни середньої швидкості [4] у двомірній площині мобільності (горизонтальної площині). Тем не менше, швидкість у VANET у деяких випадках може бути вище, ніж у FANET [5]. Ці відмінності надають прямий вплив на моделі мобільності. Оскільки ці моделі використовуються для імітації мережі в більш реалістичних сценаріях, очікується, що вона буде згадувати рух вузлів. Наприклад, модель мобільності з випадковим блуканням, що використовується в MANET, коли напрям та швидкість вузлів вибираються випадковим чином.

Більшість цих моделей для MANET і VANET близькі до реальності, оскільки рух вузлів дуже передбачуваний і є обмеження розташуванням дороги. Однак моделі мобільності, прийняті в MANET та VANET, не можуть застосовуватись безпосередньо у FANET. Необхідно запропонувати більш адекватні моделі, що відображають поведінку БПЛА з урахуванням їхньої високої тривимірної рухливості. Внаслідок більш високого ступеня мобільності вузлів у FANET зміни топології мережі відбуваються частіше, ніж у мережах MANET та VANET. Іншими факторами, які також впливають на зміни топології в мережах FANET, є швидкість вузлів, зміни відстаней між вузлами, швидкі зміни якості каналів зв'язку та скорочення терміну служби вузлів через обмеження енергоспоживання та/або невдачі. У традиційних MANET та VANET ці обставини не завжди присутні. З іншого боку, модель, що передбачає втрати при поширенні електромагнітних хвиль у FANET, відрізняється від моделі, що використовується в MANET і VANET. У них моделі втрат зазвичай припускають відсутність прямої видимості між передавачем і приймачем та наявності великої кількості відображень від навколишніх перешкод та дифракції будівель. У FANET вузли літають на значній висоті, далеко від можливих відображень, які можуть виходити від землі, будівель або перешкод. Крім того, зазвичай існує лінія прямої видимості між взаємопов'язаними вузлами FANET. Залежно від розташування вузлів можна виділити два типи каналів з різними характеристиками: канал, що з'єднує два вузли, що літають, і канал, що з'єднує літаючий БПЛА і наземний вузол. Отже, модель втрат при розповсюдженні повинна враховувати ці два типи каналів, що призводить до іншого підходу порівняно з моделями розповсюдження, що використовуються в мережах MANET та VANET.

Зокрема, в галузі телекомунікацій БПЛА можна використовувати для забезпечення покриття Wi-Fi через повітряну мережу (наприклад, у надзвичайних ситуаціях) або для заміни базових станцій бездротового зв'язку, коли вони не працюють.

У деяких дослідженнях розглядаються комунікаційні характеристики БПЛА, а в інших оцінюється рівень сигналу, щоб отримати приблизну модель каналу, яка могла б прогнозувати втрати при поширенні [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Однак більшість таких досліджень зазвичай не враховують особливості діаграми спрямованості (ДН) пристрою зв'язку, вбудованого в БПЛА, не включають дослідження ДН у контрольованому середовищі, не враховують орієнтацію антен модуля зв'язку, або навіть спрощують радіопередачу до ізотропної. Вивчення радіопередачі у контрольованому середовищі дозволило б ефективніше розгортати БПЛА у реальних умовах. Причина полягає в тому, що, володіючи цими знаннями, можливо б оптимізувати потужність, що випромінюється антенами, і, таким чином, досягти кращих результатів з точки зору пропускної спроможності, рівня сигналу та терміну служби батареї.

## 1.2 Моделі мобільності

Модель мобільності – це рух вузлів мережі, тобто зміни їхнього положення, швидкості та прискорення в часі в обмеженому сценарії. Мобільність дозволяє вузлам адаптуватися до потреб, пропонуючи більшу динаміку та кращу продуктивність залежно від вибраної моделі мобільності. Крім того, дослідники можуть реалістичніше моделювати FANET, використовуючи моделі мобільності. Оскільки вузли в мережах FANET є дуже мобільними, вибір відповідної моделі мобільності для кожного сценарію моделювання має важливе значення для оцінки продуктивності мережі перед її реальним розгортанням та отримання максимально реальних результатів [12]. Умовно можливо розділити існуючі моделі мобільності на п'ять різних класів: випадкові, залежні від часу, заплановані за шляхом, групові та гібридні.

### 1.2.1 Моделі випадкової мобільності

Моделі випадкової мобільності - це найпростіші та найпоширеніші моделі для імітації руху вузлів в одноранговій мережі. Кожен вузол випадково вибирає свій напрямок, швидкість і час незалежно від інших вузлів. У цій групі виділяються такі моделі мобільності: випадкове блукання [13], випадкова маршрутна точка [14], випадковий напрямок [15] та Манхеттенська сітка [16].

Розглянемо модель мобільності випадкової маршрутної точки. У неї кожен вузол випадково вибирає пункт призначення в області моделювання і швидкість між мінімальним та максимальним. Після цього вузол починає рухатися з цією постійною швидкістю до місця призначення, і як тільки вузол досягає місця призначення, то залишається нерухомим протягом вказаного часу. Враховуючи, що ця модель має тенденцію групувати вузли в центрі області моделювання, то вузол, що використовує модель, шукає край області, залишається статичним після прибуття, а потім вибирає новий кут напряму.

### 1.2.2 Моделі мобільності, що залежать від часу

Моделі мобільності, що залежать від часу – це моделі, у яких рух заснований на математичних рівняннях, які залежать як від моменту розрахунку симуляції, так і стану кожного вузла, щоб уникнути раптових змін швидкості і напряму. Найбільш поширеними прикладами є: безмежна область моделювання [17], Гаус-Марків [18], розширений Гаус-Марків [19], трьохмірний-Гаус-Марків [20] та плавний поворот [21].

Основним недоліком моделі мобільності безмежної області моделювання є те, що коли вузол зникає вздовж краю, то знову з'являється на протилежному краї, що може бути небажано.

З іншого боку, модель мобільності Гауса-Маркова більш реалістична, ніж інші моделі, але не дозволяє моделювати поведінку БПЛА з нерухомим крилом, особливо розвороти. Розширена модель мобільності Гауса-Маркова є модифікацією моделі Гауса-Маркова і спеціально запропонована для FANET. Результати, отримані за допомогою цієї моделі, аналогічні до поведінки БПЛА з нерухомим крилом під час польоту, оскільки в моделюванні немає раптових зупинок або різких поворотів. Крім того, має прогресивний механізм ухилення від меж, щоб уникнути країв, що дає змогу робити плавні криві на межах. Тривимірною моделлю мобільності Гауса-Маркова є ще однією модифікацією моделі Гауса-Маркова, розробленої для FANET, з основною характеристикою включення мобільності в трьох вимірах, усуваючи відскок, що виникає на межах області моделювання. Нарешті, в моделі мобільності плавного повороту вузол випадковим чином вибирає точку вздовж лінії, перпендикулярної до напрямку його руху, і літає по колу навколо цієї точки протягом випадкового часу.

### 1.2.3 Моделі мобільності з плануванням шляху

Моделі мобільності з плануванням шляху – це моделі, у яких вузли слідує за заздалегідь розрахованою траєкторією без випадкового спрямування. Вузли змушені слідувати ряду шаблонів руху, випадково змінюючись тільки між різними шаблонами, які є у кожній моделі. У цій категорії маємо моделі напіввипадкового кругового руху [22] та моделі Папараці [23].

Перша є відповідною моделлю для імітації поведінки БПЛА, що летять над точкою по колу з різним радіусом, збираючи інформацію. Друга є стохастичною моделлю мобільності, яка заснована на програмному забезпеченні автопілота Папараці для БПЛА [24]. Автопілот представляє п'ять можливих рухів: залишатися, вісім, маршрутна точка, сканування та овал.

Таким чином, модель мобільності Папараці заснована на автоматі станів, де кожен стан є одним з можливих рухів, які може здійснювати БПЛА.

#### 1.2.4 Моделі групової мобільності

Моделі групової мобільності – це моделі, які ґрунтуються на тому, що різні вузли мережі переміщуються разом навколо загальної точки. Така поведінка має великі переваги, особливо в області FANET, де цей підхід можна використовувати в багатьох програмах. Прикладами моделей: експоненційно-корельовано випадкова [25], рій частинок [26] та рух групи опорних точок [27].

Модель експоненційно-корельованої випадкової мобільності аналогічна моделям мобільності, що залежать від часу. Для керування групами вузлів додано набір змінних, налаштування яких не є простим. Модель мобільності рою частинок ґрунтується на ітеративному методі оптимізації рою частинок [28]. Ця модель обчислює швидкість і напрямок кожного вузла відповідно до попередньої швидкості/напрямку та положення, в якому вузли розташовані щодо контрольної точки.

У моделі мобільності груп опорних точок вузли групуються в кластери. Кожен кластер має центр, який може бути логічним або провідним вузлом. Центр слідує моделі мобільності випадкової маршрутною точки, і вузли будуть переміщатися навколо центру. Ця модель мобільності має безліч варіантів, найважливішими з яких є «стовпець» та «кочове співтовариство» [13].

### 1.2.5 Моделі гібридної мобільності

Моделі гібридної мобільності – це моделі, які базуються на поєднанні попередніх моделей. Наприклад, гібридна модель мобільності Маркова з «феромонами» [29] заснована на марківській моделі та моделі розподіленого відштовхування феромонів [30], що поєднує переваги обох. У той час як ланцюги Маркова покращують загальну поведінку БПЛА, підхід з феромонами дозволяє точніше контролювати мобільність локальним і динамічним способом шляхом обміну знаннями між БПЛА.

### 1.3 Протоколи для покриття

Покриття є класичною проблемою у бездротових телекомунікаційних мережах. Широко вивчені, останні пропозиції використовують еволюційні алгоритми [31], цілісне лінійне програмування [32] або жадібні алгоритми [33] серед іншого для планування найкращого розташування базових станцій і стільникових систем. Однак ці рішення не забезпечують оптимального розгортання в мережах FANET через їх унікальні характеристики. Як наслідок, були представлені оригінальні методи оптимального позиціонування вузлів БПЛА в FANET, метою яких є забезпечення покриття на рівні землі або збільшення пропускної спроможності традиційних мобільних мереж [10,34] або MANET [35]. Таким чином, запропонована таксономія ділиться на дві категорії: позиціонування на основі висоти та позиціонування на основі мереж.

### 1.3.1 Позиціонування на основі висоти

Існує кілька досліджень, у яких аналізується вплив висоти вузла БПЛА на досягнуте покриття. У [36] отримано оптимальне положення вузла БПЛА, що забезпечує максимальне покриття за допомогою математичної моделі. Модель каналу, де засновували своє дослідження, містить статистичні параметри для міського середовища, визначені Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ). Таким чином, результати включали формулу отримання оптимальної висоти на основі максимально допустимих втрат і деякі додаткові статистичні параметри. У [37] відбулось розширення. Було отримано оптимальну висоту, на якій можливо розмістити БПЛА, щоб забезпечити максимальну зону покриття з мінімальною потужністю, що передається. Крім того, вони вивчили використання двох БПЛА для забезпечення покриття у двох сценаріях, а саме без перешкод і з повними перешкодами між обома БПЛА. У першому сценарії висота та відстань між БПЛА розраховувалися для оптимального розгортання на місцевості. У другому сценарії наявність перешкод не дозволяло повністю охопити всю зону, але результати показали наявність оптимального поділу між обома БПЛА, що забезпечило найбільшу частку зони покриття. Тим не менш, автори використовували теоретичну модель каналу, не покладаючись на жодну з існуючих моделей каналу для зв'язку. Так само автори у [38] також досліджували оптимальну висоту БПЛА задля забезпечення покриття. У цьому випадку вважали, що в каналі присутні втрати на маршруті та є розсіювання. Зокрема, використали модель завмирання Райса із залежністю від кута місця. Продемонстровано, що є оптимальна позиція, яка максимізує зону покриття і становить найменші втрати.

### 1.3.2 Позиціонування на основі мереж

Існує велика кількість досліджень щодо управління позиціонуванням вузлів на основі мереж. Наприклад, розгортання мережі БПЛА з нерухомим крилом оцінюється в [39]. Ці вузли не можуть залишатися нерухомими у точці, але вони мають літати над точкою. Запропонований алгоритм динамічно регулює положення вузлів та радіус БПЛА відповідно до вимог користувачів на рівні землі, підвищуючи продуктивність мережі з погляду ймовірності охоплення та зменшення затримки. Натхненні типовими рухами бактерій (які рухаються відповідно до їх тяжіння до атракторів або від репелентів), автори в [40] отримали оптимальне положення набору вузлів FANET, встановивши висоту кожного вузла, так як вертикальні рухи вимагають більшої кількості енергії, ніж горизонтальні рухи.

У [34] проаналізовано оптимальне розгортання мережі FANET, отримавши можливість покриття лінії зв'язку БПЛА-Земля. Вони отримали положення та оптимальну висоту для кожного вузла при оптимальному розгортанні. У [41] досліджували мінімальну кількість БПЛА, необхідне забезпечення покриття в області, гарантуючи, що кожен наземний вузол має покриття принаймні одним вузлом БПЛА. Для цього БПЛА розміщувалися по внутрішній спіралі доти, доки не були покриті всі наземні вузли. Автори припустили, що канал БПЛА-Земля являє собою прямою видимості і зафіксували потужність БПЛА, що передається, для отримання мінімального відношення сигнал/шум в приймачах.

Ще одне рішення було представлено за допомогою саморозгортуючого точкового покриття [42]. Воно вивчає оптимальне позиціонування вузлів FANET у завданнях розширення покриття у разі стихійного лиха, шукає оптимальне положення для охоплення найбільшої кількості людей на БПЛА та підтримує зв'язок між кожним БПЛА. Застосування з нерухомим крилом обмежено, оскільки не враховує плавні траєкторії та прогресивні криві.

У [43] запропоновано алгоритм для знаходження оптимального стану БПЛА на основі дрібнозернистої інформації прямої видимості у сильно забудованій місцевості. Нарешті, в [44] отримано вираз ймовірності покриття для лінії зв'язку БПЛА-Земля, що моделює базові станції як однорідний біномний точковий процес, а в [45] використано функцію витрат на основі нейронних мереж для розгортання декількох БПЛА в зоні з повним покриттям. Результати показали, що змогли досягти більш високої пропускної спроможності, ніж існуюча стільникова мережа.

Незважаючи на помітні результати, досягнуті в області позиціонування, в жодному з цих досліджень не розглядався вплив який самі БПЛА можуть надавати на вбудовані пристрої зв'язку, що відповідають за забезпечення покриття і ймовірний вплив на їх результати.

### 1.3.3 Оцінка продуктивності протоколів

Для оцінки продуктивності протоколів маршрутизації для FANET використовують, як правило, шість основних показників:

1 коефіцієнт доставки пакетів: визначається як відношення успішно доставлених пакетів до пункту призначення всіх пакетів даних, згенерованим відправниками. Чим більше, то краще;

2 середня кінцева затримка: середній час проходження пакетів даних до цільових пунктів призначення. Чим менше, то краще;

3 середня кількість переходів: визначається як кількість доставлених пакетів даних, поділена на кількість переходів, що виконуються всіма пакетами;

4 накладні витрати: відношення пакетів маршрутизації до успішно доставлених пакетів у приймачах. Чим нижче, то краще;

5 пропускна здатність: кількість пакетів даних, що успішно доставляються до цільового пункту призначення протягом заданого проміжку часу. Чим більше, то краще;

б затримка: міра часу, що витрачається пакетом даних для транзиту між двома вузлами у цій мережі. Чим нижче, то краще.

Одним з основних методів аналізу алгоритмів маршрутизації є імітаційне моделювання.

#### 1.4 Алгоритми маршрутизації

Існує два типи додатків, що працюють з повітряними вузлами: одновузлова програма, в якій повітряний вузол знаходиться в центрі безлічі базових станцій, що знаходяться на землі (вузол може бути використаний станціями як роутер для комунікації з іншими станціями, що знаходяться поза межами поля діапазону зв'язку); багатовузловий додаток [46].

Якщо використовуємо один вузол, може виникнути проблеми, а саме: вузол може мати вкрай невеликий діапазон зв'язку, можуть виникати перешкоди в процесі передачі сигналу. Тому для передачі даних використовують групу повітряних вузлів. Переваги багатовузлових додатків полягають у наступному: сприяє підвищенню стійкості до відмови (при виході з ладу одного вузла інші вузли беруть на себе його роботу), окремі завдання можуть виконуватися паралельно різними вузлами, що значною мірою зменшує тривалість виконання всього завдання в цілому.

Необхідно враховувати, що для надійної роботи алгоритмів для маршрутизації необхідно достатньої кількості вузлів. Надійна маршрутизація є важливим фактором стабільності додатків та послуг, які вони надають.

Існує широкий спектр протоколів маршрутизації, запропонованих для FANET. Всі ці протоколи покликані покращити коефіцієнт доставки пакетів та мінімізувати затримки передачі даних, а також ймовірність втрати пакетів. Протоколи маршрутизації FANET можна розділити на три основні категорії: на основі топології, на основі географічного розташування, роєві.

Протоколи маршрутизації, що базуються на топології (швидкість переміщення вузлів у повітрі невисока, кількість вузлів обмежена) недостатньо вивчені FANET. Справа в тому, що, якщо швидкість переміщення вузлів висока, то алгоритми, що базуються на топології, не можуть бути застосовані досить успішно. Ще одним недоліком цих алгоритмів є споживання більшої кількості ресурсів та енергії (щодо великих витрат пам'яті, наприклад, для зберігання таблиць маршрутизації). Отже, категорія протоколів маршрутизації, заснована на топології, використовує IP-адреси для визначення вузлів та використовує існуючу інформацію про посилення в мережі для пересилання пакетів відповідним шляхом. Протоколи класифікуються наступним чином: проактивна маршрутизація (протоколи OLSR, D-OLSR, M-OLSR, CE-OLSR та DSDV), реактивна (AODV, AODVSEC, AODV з часовим інтервалом, M-AODV, APAR та DSR) та гібридна (HWMP, ZRP, SHARP, HRP та TORA). Гібридна категорія протоколів передбачає, що мережа поділяється на зони, в окремій зоні приймається проактивна маршрутизація, а зв'язок між зонами ґрунтується на реактивній маршрутизації.

Ройові протоколи маршрутизації засновані на роєвому інтелекті, який вперше використовувався для клітинної роботизованої системи. Роєві алгоритми моделюють соціальну поведінку птахів або риб у стада або комах на рої (приклади адаптивних систем, що самоорганізуються). Алгоритми спрямовані на пошук оптимального рішення. Як протоколи маршрутизації на основі рою, призначені для FANET, можна виділити BeeAdhoc і APAR.

### 1.5 Моделі розповсюдження

Характеристики радіоканалу, яким передаються хвилі, мають вирішальне значення для проектування і планування будь-якої системи зв'язку. Ці характеристики дозволяють математично моделювати канали і, таким чином, отримувати модель поширення, що імітує згасання хвиль при

їхньому поширенні. Найпростішою моделлю поширення є модель Фріса у вільному просторі [47], яка враховує лише частоту сигналу та відстань із відповідними обмеженнями.

Планування та розгортання у мережах FANET передбачає попереднє знання характеристик радіоканалу. Розрахунок потужності, що приймається в повітряній мережі від БПЛА до базової станції (або навпаки) або між двома БПЛА, вимагає відповідного моделювання каналу для кожного випадку з урахуванням унікальних характеристик цих мереж з точки зору розповсюдження, таких як висока ймовірність прямої видимості, ефекти відображення від землі, ефекти руху в тривимірному площині БПЛА (крен, тангаж і нишпорення), зміни умов навколишнього середовища або відмінності у відстанях між вузлами. Завдяки цим характеристикам розроблено ряд теоретичних, емпіричних та напівемпіричних моделей, які апроксимують модель втрат у каналах, через які відбуваються послаблення електромагнітних хвиль.

### 1.5.1 Теоретичні моделі розповсюдження

Теоретичні моделі розповсюдження відображені в багатьох роботах, зокрема в [11]. Автори запропонували дуже докладну модель поширення каналу БПЛА-Земля для малих повітряних ділянок. Модель враховувала безліч факторів, які не враховувалися в інших теоретичних моделях, таких як висота польоту БПЛА, конкретні умови (міські, приміські, густонаселені та багатоповерхові), дощ (слабкий, помірний та сильний), багатопроменеві завмирання, ймовірність прямої видимості, затінення, поширення хвиль, поглинання газами, доплерівський розкид та інші додаткові втрати, які можуть мати місце. Однак у цій моделі не враховувався вплив, який БПЛА може зробити на діаграму спрямованості пристрою зв'язку.

У [48] запропонована інша модель теоретичних втрат при поширенні для каналу БПЛА-Земля у різних типах міських районів у смузі частот від 2 до 6 ГГц. Крім того, у цій моделі враховувався кут місця між БПЛА та наземним вузлом, а також можливість прямої видимості. Нарешті, модель була зіставлена з набором реальних вимірів, які показують що застосування цієї моделі поширення цілком можлива.

### 1.5.2 Емпіричні моделі розповсюдження

Емпіричні моделі розповсюдження отримані на основі серії вимірювань, виконаних у різних міських та сільських сценаріях. Наприклад, в [49, 50] модель каналу БПЛА-Земля була отримана з набору вимірювань в діапазоні 800 МГц. У [51] підбито підсумки кампанії з вимірювань БПЛА-Земля. Показано отримані результати та моделі поширення, розраховані у серії експериментів, проведених спільно з NASA. У [52] вивчалися моделі надширококуткового поширення для каналів БПЛА-Земля, що дозволяють передавати сигнали з ширшою смугою пропускання, з меншим згасанням за рахунок проникнення і добре співіснують з вузькосмуговими сигналами.

### 1.5.3 Напівемпіричні моделі розповсюдження

Дослідження напівемпіричних моделей розповсюдження відображено наприклад у [53]. Запропоновано метод вибору середовища або районів (міських, приміських, сільських, гірських, біля моря тощо), де буде розгорнуто повітряну мережу, щоб вибрати модель поширення каналу БПЛА-Земля, яка більше адаптується до реальності. Результати показали, що метод працює в різних умовах. У [54] проаналізувано застосування традиційних моделей поширення до FANET. Для цього проведено порівняння різних моделей поширення, що використовуються для звичайних мобільних систем з моделлю трасування променів.

Таким чином, у більшості робіт, присвячених вивченню сучасних моделей поширення, не розглядався вплив, який БПЛА може на діаграму спрямованості інтегрованого пристрою зв'язку. Це може призвести до помилкових результатів щодо мобільності, позиціонування та загалом продуктивності, оскільки втрати наприклад через шасі БПЛА, вібрації, не враховуються в теоретичних моделях або ці втрати помилково включаються до складу іншого фактора, такого як шум у неконтрольованому середовищі.

З цього можливо зробити висновок, що фактор який враховує положення і орієнтацію БПЛА та вузлів на землі, повинен бути включений у моделі розповсюдження, щоб включити втрати через наприклад шасі й вібрації БПЛА в діаграму спрямованості вбудованого пристрою зв'язку. В результаті буде отримано уявлення очікуваних втрат для різних каналів (БПЛА-БПЛА та БПЛА-Земля) у всіх просторових площинах.

## 1.6 Практичні результати

У роботі [55] була проведена серія експериментів із вимірювання рівня сигналу, що приймається, у каналі БПЛА-Земля за стандартом 802.11a у діапазоні 5 ГГц. Крім того, було визначено найкраще розташування антен з точки зору забезпечення більш високого рівня сигналу, що приймається. Результати показали, що коли антени були розташовані горизонтально, відмінності в нищпоренні можна було обробляти, але якщо антени розташовувалися перпендикулярно землі, рівень сигналу сильно змінювався під час прискорення/гальмування БПЛА. У [7] було проведено серію експериментів з вимірювання прийнятої потужності в лінії зв'язку БПЛА-Земля. У кожному вузлі зв'язку використовувалися три передавальні антени в трикутному положенні, щоб усунути нулі і тим самим запобігти ортогональній поляризації. В експериментах наземна базова станція фіксувалася, а БПЛА рухався за різними сценаріями на різній висоті, орієнтації та відстані. Основним недоліком цієї роботи є відсутність

контролю за параметрами навколишнього середовища, такими як перешкоди або відображення, які можуть змінити результати та обмежити відтворюваність. У [56] проведено серію вимірювань каналу БПЛА-Земля у замиському гірському середовищі на частотах 968 МГц та 5060 МГц. У [57] виконано серію вимірювань сигналу, прийнятого з каналу БПЛА-Земля, при різних положеннях антен, різній висоті базової станції та різних відстанях між вузлами.

Був зроблений висновок, що для отримання найбільшої пропускної спроможності і, отже, найбільшого рівня сигналу, що приймається, антени обох пристроїв мають бути паралельними один одному. Таким чином, жодна з цих попередніх робіт не дала точних результатів через відсутність контролю над експериментальним сценарієм, що обмежувало відтворюваність та застосовність отриманих результатів. Отже, необхідно вивчити вплив БПЛА на діаграму спрямованості вбудованого пристрою зв'язку в повністю контрольованому середовищі.

У відповідних експериментах використовувався БПЛА IdeaflyIFLY-4S, квадрокоптер з шасі з вуглецевого волокна, безколекторні двигуни та змінні пластикові гвинти. До цього до БПЛА додали модуль бездротового зв'язку, зокрема, прошивку роутера WiTi Board [58], що базується на OpenWRT v14.07 з дводіпазонним та двома антенами роз'ємами для кожного діапазону, що дозволяє одночасно підключати до чотирьох антен. Наборами мікросхем для зв'язку були MT7602E, що підтримує 802.11 b/g/n WiFi 2T2R, і MT7612E, що підтримує 802.11 a/b/g/n/ac WiFi 2T2R з використанням діапазонів 2,4 ГГц і 5 ГГц відповідно. Обидва чіпсети можуть працювати незалежно та одночасно. Використовувалися дводіпазонні антени двох типів: антени з всеспрямованою діаграмою спрямованості та посиленням 5 дБ в обох діапазонах та спрямовані патч-антени з посиленням 8 дБ для 2,4 ГГц та 10 дБ для 5 ГГц.

Аналізатор спектру R&S ZVL використовувався для прийому для захоплення сигналів до 6 ГГц разом з антеною приймача R&S HF906 з великою шириною смуги прийому (від 1 ГГц до 18 ГГц) та постійним коефіцієнтом посилення (10 дБ для 2,4 ГГц та 11 дБ для 5 ГГц).

Використовувана безехова радіочастотна камера являла собою повну камеру з ізолюючими конусами, які запобігали відображенню електромагнітних хвиль від стін, стель і підлог. БПЛА із вбудованим Wi-Fi розміщувався на поворотному столі. Wi-Fi був налаштований для роботи як передавач (клієнт) у сеансі передачі даних. З цією метою використовувався генератор трафіку iperf v2.0.9 [5] у стандартній конфігурації для відправки трафіку TCP. Як сервер сеансу використовувався пристрій USB-Wi-Fi, розташований усередині безехової радіочастотної камери і керований комп'ютером зовні камери. Поки поворотний стіл обертався, аналізатор спектру ZVL, підключений до антени HF906, вловлював потужність Wi-Fi. Вимірювання потужності проводилися через кожні 10 градусів у смузі пропускання 20 МГц із центром на центральній частоті зі смугою роздільної здатності 3 кГц, таким чином усуваючи межі робочої смуги та залишаючись у плоскому частотному спектрі. Захоплена потужність була усереднена і було отримано значення, що представляє потужність, отриману для кожного кута повороту (всього 36) на відстані 3 м та висоті 1,5 м (виконання умови далекого поля для обох робочих діапазонів та обох антен).

Було проведено три серії експериментів, опис та результати яких пояснюються в такий спосіб. Перша серія експериментів була спрямована на те, щоб отримати найкращу конфігурацію антен для Wi-Fi як ізольованого пристрою, тобто найбільш підходящу орієнтацію для досягнення максимальної потужності сигналу. Це було зроблено для діапазону 2,4 ГГц та діапазону 5 ГГц, які відповідали каналам БПЛА-БПЛА та БПЛА-Земля.

Щоб отримати максимально точну діаграму спрямованості, було вивчено три площини, зображені як площину X, площину Y та площину Z. У межах кожної площини вивчалися як вертикальна, так і горизонтальна поляризація. Області, що цікавлять, використовувалися для вибору найкращої конфігурації антен з урахуванням конкретного сценарію. Зокрема, передбачалося, що для зв'язку між БПЛА (лінії БПЛА-БПЛА) області інтересу повинні бути розташовані в одній горизонтальній площині ( $\pm 45^\circ$ ). Тобто, область інтересу для зв'язку між БПЛА відповідає повній площині X плюс дві області по  $90^\circ$  (від  $45^\circ$  до  $135^\circ$  і  $-45^\circ$  до  $-135^\circ$ ), видимі з площин Y і Z. З іншого боку, встановлено область інтересу для зв'язку БПЛА-Земля як охоплення  $90^\circ$  (від  $135^\circ$  до  $-135^\circ$ ) у площинах Y та Z від БПЛА до землі. Отже, оптимальна конфігурація антени була такою, щоб максимальна потужність була отримана у певних галузях інтересу. Необхідно зазначити, що для іншого типу розгортання мережі, наприклад, у випадку супутникового зв'язку БПЛА, область інтересу для зв'язку БПЛА-Супутник буде іншою, в цьому випадку, буде цікаво використовувати конфігурацію антен, яка максимізує передачу потужності в площинах Y і Z кутом  $90^\circ$  (від  $-45^\circ$  до  $45^\circ$ ).

Якщо антени повертаються між собою на  $90$  градусів, маємо поляризаційне рознесення і таким чином уникаємо ситуації перехресної поляризації між приймальною антеною та будь-якою з передаючих антен одночасно. Ще однією важливою особливістю було посилення антен. Для цього канал БПЛА-Земля необхідно відрегулювати для досягнення ширини основної пелюстки близько  $90^\circ$ , що дозволило відрегулювати в області, що цікавить, від  $135^\circ$  до  $-135^\circ$ . Це посилення є оптимальним значенням для діапазону  $2,4$  ГГц з коефіцієнтом посилення  $8$  дБ в порівнянні з  $10$  дБ в діапазоні  $5$  ГГц. Однак з  $5$  ГГц буде більш вузька пелюстка, яка не відповідає області, що цікавить.

Метою другої серії експериментів було вивчення впливу (якщо таке є) шасі БПЛА, двигунів БПЛА (кількість обертів та вібрації, створювані антенами та шасі) та гвинтів БПЛА на діаграму спрямованості у діапазонах 2,4 ГГц і в 5 ГГц. Для цього WiTi розташовувався на борту БПЛА і продовжував працювати як клієнт, передаючи дані на серверний пристрій. Опинившись усередині безехової камери, проведено вимірювання у таких станах: БПЛА вимкнений, БПЛА включений з двигунами на 45% потужності з гвинтами і без них, БПЛА включений на 65% потужності без гвинтів та БПЛА включений на 95% потужності без гвинтів. Отримані результати свідчать, що вплив дрона на діаграму спрямованості переважно було пов'язані з шасі. Вплив гребних гвинтів, потужності двигунів та вібрації, створюваної двигунами, у дослідженні було незначним. Вся система була врівноважена без вібрацій, тому що було використано безщітковий двигун, а гвинти були виготовлені з пластику. Цей результат міг бути іншим, якби використовувалися гвинти з вуглецевого волокна, що потребує додаткової роботи.

Що стосується ефекту шасі БПЛА, то був більш помітний в літаках в площинах Y і Z. Таким чином, лінія БПЛА-Земля (площини Y і Z) була порушена більше, зі зміною потужності, що приймається, до -10 дБ в діапазоні 2,4 ГГц. Щодо площини X в діапазоні 2,4 ГГц, спостерігається -5 дБ під деякими кутами, зменшуючи потужність майже до чверті початкового значення. Результати, отримані в площині Z, були ідентичні результатам у площині Y. Виходячи з цих спостережень, можна включити вплив БПЛА моделі поширення шляхом моделювання БПЛА як додаткових системних втрат.

Для БПЛА, подібних до цього дослідження, системні втрати були еквівалентні -10 дБ на лінії БПЛА-Земля і -5 дБ на лінії БПЛА-БПЛА. Таким чином, можна гарантувати, що потужність, отримана в кожному з діапазонів, завжди дорівнюватиме або більше розрахункової, якщо дотримані межі областей інтересу.

Після того, як було продемонстровано, що вплив БПЛА пов'язаний тільки з шасі, метою останньої серії експериментів було отримання найбільш точної діаграми спрямованості всієї системи з використанням оптимальної конфігурації антен для передбачуваного розгортання мережі, тобто конфігурація антен, що забезпечує найбільшу потужність, що випромінюється, кожному каналу зв'язку БПЛА-БПЛА та БПЛА-Земля. Отримані результати представляють реальні діаграми спрямованості, які слід враховувати для ефективного розгортання мережі. Крім того, при такій конфігурації антен можна припустити, що діаграма випромінювання, створювана БПЛА, була ізотропною для лінії БПЛА-БПЛА і неізотропною, але постійною для лінії БПЛА-Земля, обидві в межах областей інтересу, описаних вище кожної лінії зв'язку.

Таким чином, отримано найкраще положення антен для Wi-Fi з урахуванням того, що це буде антенний вузол. У той час як зв'язок зазвичай зосереджений у двомірній площині, цей тип повітряного зв'язку повинен забезпечувати надійне тривимірне покриття. Зокрема, отримано найкращу конфігурацію антен для каналу БПЛА-БПЛА та для БПЛА-Земля, що працюють у діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц. Після цього зроблено висновок, що вплив шасі БПЛА являє собою зниження потужності, що передається, приблизно на 10 дБ для каналу БПЛА-Земля, що означає, що потужність впала до однієї десятої частки потужності вихідного значення. Діаграма спрямованості пристрою зв'язку на борту БПЛА не повинна апроксимуватися ізотропною діаграмою, якщо не використовується правильна орієнтація антен й не забезпечується і якщо діаграма спрямованості не відповідає ізотропні, принаймні цікаві напрями для області мають постійне випромінювання.

## 2 ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ

### 2.1 4NEC2

4NEC2 - це безкоштовна програма для моделювання антен, яка заснована на чисельному електромагнітному коді (NEC). Програму використовують для моделювання антени, а потім шляхом моделювання визначають такі властивості, як діаграма спрямованості та коефіцієнт стоячої хвилі змодельованої антени.

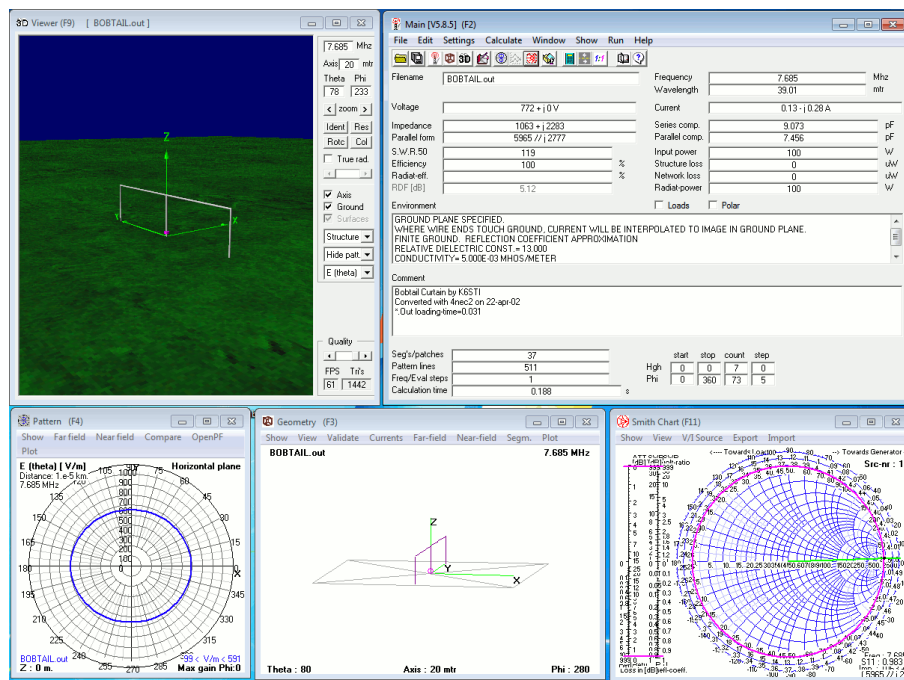


Рисунок 2.1 – Інтерфейс 4NEC2 на конкретному прикладі моделювання

Складність, пов'язана з моделюванням всіх фізичних компонентів БПЛА та пристрою зв'язку Wi-Fi з високим ступенем деталізації (антени, шасі з вуглецевого волокна, двигуни, металеві деталі, вібрації тощо) в електромагнітному симуляторі, такому як 4NEC2, HFSS, CST дуже високі.

Існують такі переваги.

1 Використання шаблону далекого поля:

а) Використання 2D вигляду (за замовчуванням), що з'являється після виконання. Дозволяє повертати визначені користувачем фрагменти на 360 градусів і отримувати детальні дані посилення як функції кута так і азимута;

б) Використання 3D кольорового вигляду, доступного зі спадного списку після запуску моделі. Можна відобразити антену, а також її повний 3D вигляд, кольоровий код з точки зору посилення дБ, візуальний вигляд. Вид дає можливість детального тривимірного аналізу діаграми спрямованості антени в контексті розташування антени, щоб зрозуміти піки, нулі та всі аспекти складного поширення далекого поля. Дуже складні діаграми з'являються на всіх діапазонах  $< 80$  м на ОСФ;

в) 3D вид дроту, який можна вибрати на перегляді антени (за замовчуванням). Нарізаний із зменшенням кута, зазначеним у налаштуваннях моделювання. Можливо обертати кожен фрагмент посилення далекого поля під кожним кутом навколо антени.

2 Символьне представлення, що забезпечує математику та оптимізацію та автоматизацію оптимізації. Змінна конструкція антени має здатність побудувати модель, визначаючи програмний еквівалент змінної за допомогою декларації SY (у поєднанні з інтеграцією Ворса двох підходів оптимізації разом) даючи можливість знаходити оптимальні результати за допомогою автоматизації програмного забезпечення, а не ручного налаштування. Це дозволяє конструктору вказати, наприклад, для ОСФ як змінні довжини сегментів і кут від вертикалі. У складних моделях антен ім'я змінної можна повторно використовувати в кількох місцях. Немає необхідності вручну змінювати змінну кілька разів.

3 Нелінійна оптимізація вибраних символьних змінних. Побудувавши модель в символьному форматі, результуючу модель можливо оптимізувати за допомогою вбудованого нелінійного оптимізатора або окремого генетичного еволюціонера, що дозволяє ширше перевіряти різні варіанти.

Приклад. Побудова моделі ОСФ із ізольованим дротом. Обирається ім'я змінної для двох довжин дротяної антени (коротка та довга), запуск оптимізатора з коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ) рівним 100. Програма запустилася та повернула оптимальну довжину для мінімального КСХ. На Windows 10 з жорстким диском SSD NVME знадобилося 24 ітерації приблизно за 14 секунд. Жодних ручних змін та перезапуску не потрібно. Щодо обмежень для оптимізації: можна оптимізувати посилення, відношення КСХ або збалансувати у виваженому форматі.

4 Розгорнення частоти. Можливість взяти модель та сканувати діапазон частот для побудованої модельної системи та повернути КСХ, імпеданс, посилення та відношення F/V у вигляді графіка залежно від частоти, а також записати масив даних для подальшого аналізу у платформи, такі як Matlab.

Приклад. Для ОСФ проводиться сканування від 3,0 МГц до 29,0 МГц для КСХ для перевірки впливу відносних висот центру та кінця на імпеданс. Таким чином, можливо дати висновок: чи потрібен балун 4:1 або 5:1 або 6:1 і заощаджує час, витрачений на фізичне тестування поганих конфігурацій. Процедура побудови графіка за замовченням є повнофункціональною, і масив даних можливо зберегти. За бажанням користувач може підключитися до графіку GNU, встановивши його.

5 Повернення інформації на головну сторінку. Інформація про дані повертається після запуску моделі на головну сторінку, а також ефективність антени і випромінювана потужність щодо потужності, що подається. Якщо задавати в моделі мережу LC, то код обчислюватиме втрати. Код також обчислює як ефективність антени (втрати через погодження з мережею), так і загальну ефективність випромінювання, збираючи інформацію про втрати на землю для реальної землі.

6 Моделювання лінії електропередачі. Можливість складання та використання оригінальних «карт» лінії передачі. Це дозволяє додати до моделювання реальні втрати лінії передачі для узгодження КСХ реальної системи.

7 Автоматичне порівняння мереж для кількох типів мереж. Вбудований, повністю автоматизований алгоритм узгодження мережі з вибором користувача, а також послідовного або паралельного узгодження секцій у будь-якій точці антени або лінії передачі. Разом із обчисленням втрат можливо приблизно спроектувати узгоджувальну мережу для зазначеної модельної системи.

Приклад. Дизайнер будує підняту вертикаль з довжиною хвилі  $5/8$  на 10 м. Помістивши точку RF в нижній частині вертикалі і, використовуючи автоматизацію порівняння мережі, після побудови шаблону далекого поля, може вибрати тип зіставлення мережі. Всі параметри повертаються як у L, C, R, а також у комплексних координатах, якщо є бажанням згодом назавжди додати їх до моделі.

8 Моделювання імпедансу лінії передачі. Можливість вказати хвильовий опір для розрахунку КСХ.

9 Безкоштовна програма для використання.

Недоліки:

1 використання програми лише для моделювання роботи компонентів, а не сукупного моделювання взаємодії та руху об'єктів у реальному часі;

2 при роботі з короткохвильовими антенами взаємодія з навколишнім середовищем робить результати трохи приблизними: такі довгі хвилі унеможливають попадання середовища в ближнє поле антени, змінюючи очікувану антену;

3 необхідно проявляти велику обережність, щоб слідувати за проблемами, які можуть виникнути в процесі створення та моделювання;

4 фантомний монополь має проблему з пропускнуою здатністю системи. У військовому додатку [4] частота зв'язку коливається в межах 30-90 МГц, що є досить широкосмуговим діапазоном. У [4] було виявлено, що всі спрямована діаграма спрямованості залишалася такою до частоти вище 60 МГц, коли діаграма спрямованості починала погіршуватися;

5 має достатньо складне керування для користувача.

## 2.2 Cisco Packet Tracer

Packet Tracer – це кросплатформовий інструмент візуального моделювання, який дозволяє створювати мережеві топології та імітувати сучасні комп'ютерні мережі.

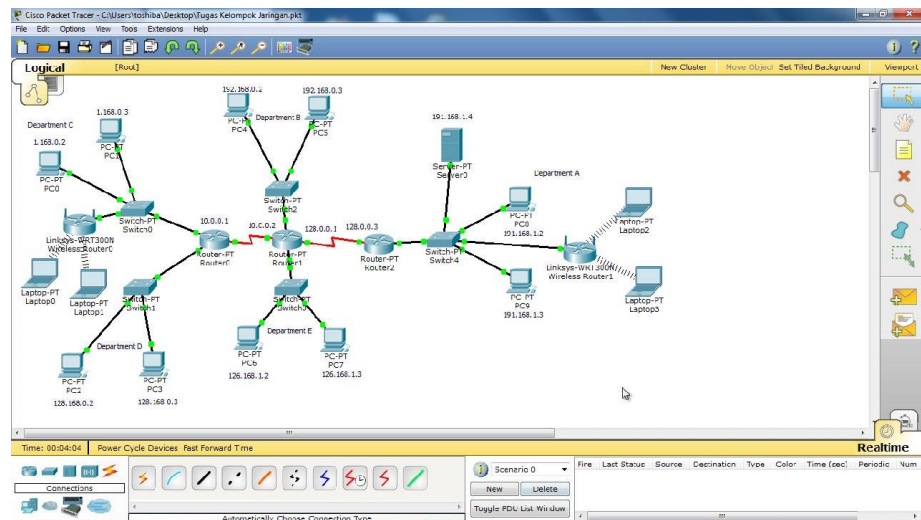


Рисунок 2.2 – Процес побудови мережевої топології в Cisco Packet Tracer

Програмне забезпечення моделює конфігурацію маршрутизаторів та комутаторів Cisco за допомогою змодельованого інтерфейсу командного рядка. Packet Tracer використовує інтерфейс перетягування, що дозволяє користувачам додавати і видаляти змодельовані мережні пристрої на свій розсуд.

Програмне забезпечення підтримує такі протоколи:

1 на прикладному рівні: FTP, SMTP, Telnet, AAA, SNMP, SSH, DNS, DHCP, HTTP, POP3, ISLVOIP, NTP;

2 на транспортному рівні: TSpand, TCP, UDP, NagleAlgorithm & IPFragmentation, RTP;

3 на мережевому рівні: IPv6, IPv4, ICMP, ICMPv6, BGP, RIPv1/v2/ng, Multi-AreaOSPF, EIGRP, StaticRouting, Route Redistribution, Multilayer Switching, L3 QoS, NAT, CBAL, GREVPN, IPSecVPN.

#### Переваги:

- 1 дозволяє моделювати топології мереж практично будь-якого розміру;
- 2 доступний режим симуляції;
- 3 доступний SIM-режим;
- 4 моделювання мережі у режимі реального часу;
- 5 інтуїтивно зрозумілий інтерфейс;
- 6 багатомовність;
- 7 велика кількість різноманітного обладнання;
- 8 рівень шуму мінімальний або відсутній.

#### Недоліки:

- 1 SIM-режим недоступний у реальній передачі;
- 2 у Frame Relay відсутні команди;
- 3 немає підтримки налагодження пакетів OSPF;
- 4 при використанні великої кількості пристроїв гарантовано спостерігатиметься падіння продуктивності;
- 5 деякі елементи програми необхідно включати вручну, щоб вони працювали (маршрутизатори та комутатори, які, якщо вони не включені, не працюватимуть, і це також може призвести до неправильної роботи мереж та повторних помилок у роботі мереж);
- 6 на рівнях комутаторів комутація приймає Etherchannel (технологія агрегації/об'єднання каналів), що часто впливає на порт STP і призводить до петель;
- 7 неможливо повноцінно використовувати комутатори, які використовують велику кількість специфічних інтегральних схем і таким чином дуже складно емулювати. Залишається використовувати модулі для маршрутизаторів;
- 8 можливо використовувати для моделювання поведінки передачі даних мережі між вузлами, але не рухомих об'єктів.

## 3 МЕТОД АВТОЮСТУВАННЯ

### 3.1 Загальна інформація про Three.js

Для створення моделі для підвищення ефективності та/або забезпечення гарантованої передачі даних (пакетів в секунду) потрібна бібліотека Javascript Three.js. Three.js покладається на можливості WebGL (працює на низькому рівні з WebGL, набором класів з чітким інтерфейсом для швидкого розвитку та розробки), маючи можливість працювати з Canvas та SVG також.

Основні концепції, з якими він взаємодіє: засіб візуалізації (об'єкт, що відображає обрану сцену з обраної камери на сцені), сцена (тривимірний простір, в якому розташовані джерела світла і елементи), камера (точка огляду сцени з певними характеристиками), джерела світла (елемент, який створює освітлення сцени), меш (елемент сцени, що складається з геометрії і матеріалу), геометрія (набір вершин, які при відображенні з'єднуються графічними примітивами), матеріал (як елемент відображається і зовнішній вигляд), текстура (зображення, яке можна використовувати в матеріалі для настройки зовнішнього вигляду об'єкта).

Сцена може складатися з осей X, Y і Z. Залежно від напрямку камери можна побачити або не помітити ту чи іншу вісь, на якій розташований об'єкт. Взаємодія виглядає наступним чином, що зображено на рисунку 3.1:

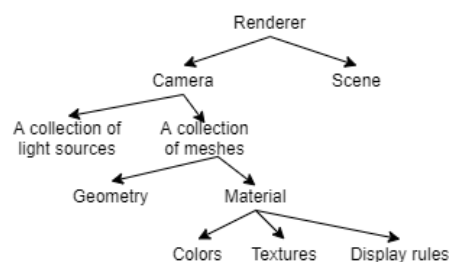


Рисунок 3.1 – Ієрархія взаємодії об'єктів між собою

Об'єкти на сцені можна додавати та видаляти в режимі реального часу. Камера перспективна та ортографічна. Зовнішні джерела світла є зовнішніми, спрямованими та точковими. Об'єктами можуть бути частинки, сітки, спрайти, лінії, скелетна анімація тощо.

### 3.2 Модель взаємодії

Модель взаємодії складається з трьох типів: Земля-Земля, БПЛА-Земля, Земля-Супутник. Основна увага приділяється взаємодії між БПЛА-БПЛА та БПЛА-Земля.

На рисунку 3.2 зображено досліджуваний район із кольорами (синій - вода, червоний - гірські або подібні масиви, зелений - рівнина, жовтий - пагорби, фіолетовий - промислові об'єкти, білий - не досліджуючі ділянки) та об'єкти (БПЛА, наземні станції, супутники, погодні умови).

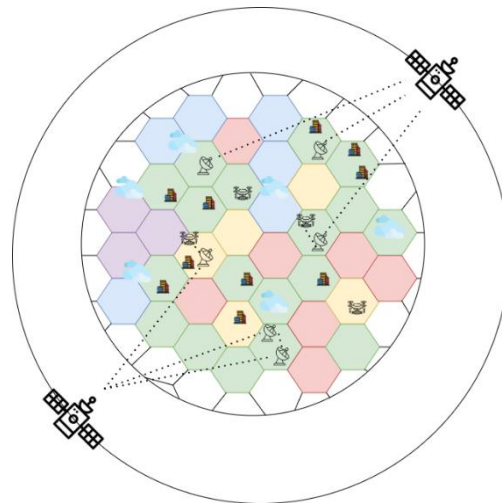


Рисунок 3.2 – Загальна модель сценаріїв взаємодії об'єктів

На рисунку 3.3 зображено збільшена модель (наземна станція, БПЛА та супутник). Наземна станція має певний радіус прийому / передачі сигналів / пакетів даних. При передачі / передачі від наземної станції до БПЛА / наземної станції до наземної станції / наземної станції до супутника

використовується той чи інший протокол маршрутизації, який впливає на передачу даних. БПЛА і супутник мають власну швидкість і орбіту (довільну і навколо Землі відповідно). Коли виявляється вхід радіуса БПЛА у радіус наземної станції, то наземна станція починає виконувати автоматичне налаштування та вирівнювання до БПЛА з технічно дозволеною швидкістю (обертання навколо своєї осі на 360 градусів та горизонтально на 180 градусів). Якщо є інші БПЛА, що знаходяться поза радіусом наземної станції або в радіусі наземної станції 2 або більше об'єктів, тоді наземна станція не буде взаємодіяти з ними (режим точка-точка).

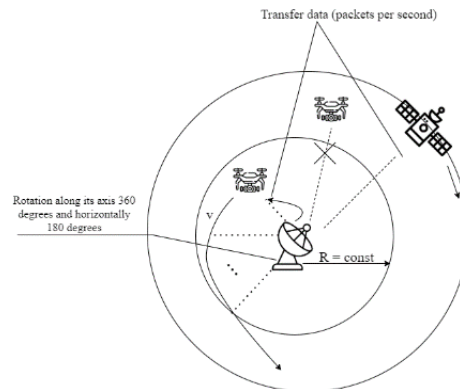


Рисунок 3.3 – Сценарій взаємодії на конкретній наземній станції (збільшена модель)

Модель сценарію взаємодії БПЛА-Земля представлена на рисунку 3.4.

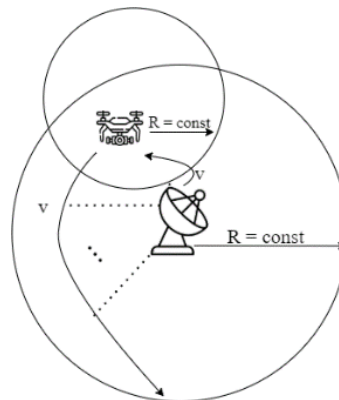


Рисунок 3.4 – Сценарій взаємодії БПЛА-Земля

Відстань для передачі даних визначається перетином радіусів за формулою 1 (евклідова відстань):

$$L_{R_1, R_2} = \sqrt{(x_{R_2} - x_{R_1})^2 + (y_{R_2} - y_{R_1})^2 + (z_{R_2} - z_{R_1})^2} \quad (1)$$

Передача даних здійснюється у разі працездатності двох сторін, наявності даних для передачі та можливості їх технічної передачі як такої, а також виконання однієї з двох умов:  $R \leq L_{R_1, R_2} < 2R$  або  $L_{R_1, R_2} < R$ .

У моделюванні використовується ікосаедр із п'ятикутною сіткою, яка ділиться на ділянки з шістьма секторами із власними кольорами та об'єктами, які можливо створювати та налаштовувати. Камера має можливість масштабуватися. Прототипом для створення об'єктів є модальне вікно на рисунку 3.5, що дозволяє: встановити радіус / швидкість руху / швидкість передачі даних / протокол маршрутизації наземної станції / БПЛА / супутника, прапор увімкнути / вимкнути проєціювання об'єктів, рівні погоди (зелений, жовтий, оранжевий, червоний), інтенсивність електромагнітних або інших перешкод (низька, середня, висока). БПЛА мають задану траєкторію руху, супутник рухається навколо сфери за заданою траєкторією, наземна станція вступає в дію при передачі даних.



R (Ground station, m):	100
R (UAV, m):	10
R (Satellite, m):	10000
V (Ground station, m/s):	0,1
V (UAV, m/s):	0,5
V (Satellite, m/s):	10
Transfer data (Ground station, p/s):	100
Transfer data (UAV, p/s):	10
Transfer data (Satellite, p/s):	1000
Protocol (p/s):	OLSR
Projection	<input checked="" type="checkbox"/>
NHL	
EII	

Рисунок 3.5 – Інтерфейс налаштування об'єктів (прототип)

Автоналаштування/вирівнювання в моделюванні відбувається завдяки кватерніонам - набір з 4 параметрів, що визначають вектор та кут повороту навколо цього вектора (формула 2):

$$q = [x, y, z, w] = [\bar{v}, w] \quad (2)$$

Перші три складові представляють вектор, що лежить на осі обертання, а довжина вектора залежить від кута повороту. Четверта складова залежить лише від величини кута повороту. Співвідношення досить просте - якщо взяти одиничний вектор  $v$  за вісь обертання і кут альфа для обертання навколо цієї осі, то кватерніон, що представляє це обертання (формула 3):

$$q = [\bar{v} \sin(\frac{\alpha}{2}), \cos(\frac{\alpha}{2})] \quad (3)$$

Поворот у площині може бути заданий матрицею 2 на 2, в якій будуть записані косинуси та синуси кута повороту. Кватерніон зберігає комбінацію осі обертання та матриці напівобертання навколо цієї осі.

Спочатку вказується, з якої початкової орієнтації осі відбуватиметься обертання. Одиничний вектор робиться у напрямку початкової орієнтації. Далі, щоб рухатись у напрямку поточної орієнтації, можна повертати початковий вектор орієнтації за допомогою обертання, описаного поточним кватерніоном. Результат - одиничний вектор, спрямований у правильному напрямку. Далі одиничний вектор масштабується, щоб представити рух на неединичній відстані та додати його до поточного положення.

У деяких випадках кватерніон зручно розглядати як 4D-вектор, а деякі операції з ним виконуються як над векторами, наприклад, додавання, віднімання та множення на скаляр (формули 4...6):

$$q + q' = [x + x', y + y', z + z'] \quad (4)$$

$$q - q' = [x - x', y - y', z - z', w - w'] \quad (5)$$

$$qq' = [vv' + ww' + w'v, ww' - \bar{v}v'] \quad (6)$$

Поворот тривимірного вектора  $v$  на кватерніон  $q$  визначається як формула 7, завдяки чому вектор перетворюється в кватерніон як формула 8, а кватерніон повертається у вектор, як формула 9.

$$\bar{v}' = q\bar{v}q^{-1} \quad (7)$$

$$q = [x, y, z, 0] \quad (8)$$

$$\bar{v} = [x, y, z] \quad (9)$$

Матриця обертання виражається через компоненти кватерніона таким чином:

$$\begin{bmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\partial e \ x = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), y = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), z = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), w = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Приклад пошуку першого елемента матриці обертання:

$$matrix[i][j] = 1 - 2(y^2 + z^2) = 1 - 2\left(\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) =$$

$$1 - 2\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) = 1 - 2\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \cos \alpha$$

Сума діагоналей матриці (формула 12) з урахуванням тригонометричної тотожності (формула 11). Результат отримано у формулі 13, звідки  $w$  буде дорівнює значенню (формула 14). Завдяки чому знайдено  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (формула 15).

$$x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = 1 \quad (11)$$

$$d = d_1 + d_2 + d_3 = 1 - 2y^2 - 2z^2 + 1 - 2x^2 - 2z^2 + 1 - 2x^2 - 2y^2 \quad (12)$$

$$d_s = d = 3 - 4x^2 - 4y^2 - 4z^2 = 3 - 4(1 - w^2) = 4w^2 - 1 \quad (13)$$

$$w = \frac{\sqrt{1+d}}{2} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= 1 - 2y^2 - 2z^2 = 1 - 2(y^2 + z^2) = \\ &= 1 - 2(1 - x^2 + w^2) = 2x^2 + 2w^2 - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{\frac{d_1 + 1 - 2w^2}{2}} \\ y &= \sqrt{\frac{d_2 + 1 - 2w^2}{2}} \\ z &= \sqrt{\frac{d_3 + 1 - 2w^2}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

Перетворення матриці в кватерніон є не менш ефективним, ніж кватерніон в матрицю, але в підсумку отримують кватерніон не одиничної довжини.

Ефективним використанням кватерніонів є інтерполяція орієнтації об'єкта. Інтерполяція обертання часто важлива для анімації ключових кадрів, екстраполяції та інтерполяції об'єкта з обчислених станів (наприклад, компенсація затримки даних по мережі). Для інтерполяції кватерніонів одиничної довжини наведено формулу 16 (сферична лінійна інтерполяція SLERP):

$$iq = \frac{q \sin((1-t)\theta) + q' \sin(t\theta)}{\sin \theta} \quad (16)$$

Якщо інтерполювати кватерніони лінійно, то інтерпольований кватерніон буде лежати на тій самій короткій дузі, лінія кватерніона більше не буде дорівнювати довжині вихідних кватерніонів, а інтерполяція залишатиметься плавною, але кут повороту не буде інтерпольований лінійно, але вздовж деякої безперервної кривої.

Ікосаедр із п'ятикутною сіткою можна побудувати на основі трикутної сітки, таким чином отримуємо п'ятикутний ікоситетраедр (пентакісдодекаедр) на рисунку 3.6. Метричні характеристики та кути кожного додекаедра пентакіса будуть однаковими по відношенню один до одного і рівномірно розташовані по площі на рисунку 3.7.

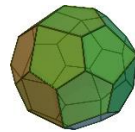


Рисунок 3.6 – Пентакісдодекаедр

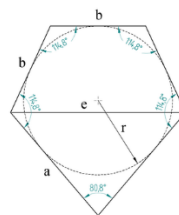


Рисунок 3.7 – Метричні показники для кожного пентакісдодекаедра

Цей підхід, заснований на моделюванні, дозволяє набагато точніше визначати ситуації, в яких відбудуватиметься підвищення ефективності та / або гарантована передача даних за допомогою браузера. Є приклади прототипів, на основі яких можна здійснити повну реалізацію за рисунками 3.8...3.10.

Рух об'єктів базується на кватерніонах, можливо змінювати параметри / характеристики об'єктів, вибирати протокол обміну даними тощо. Після цього, як розвиток, використання глибоких нейронних мереж для надання оцінки змодельованого сценарію.

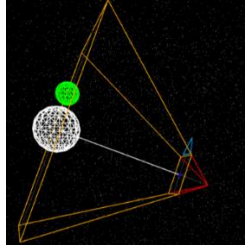


Рисунок 3.8 – Приклад проєкції, сферичних об'єктів

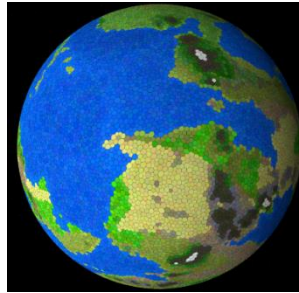


Рисунок 3.9 – Перетворений пентакісдодекаедр з пятикутною сіткою

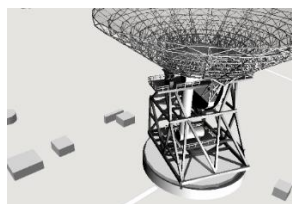


Рисунок 3.10 – Наземна станція

## 3.3 Блок-схема роботи

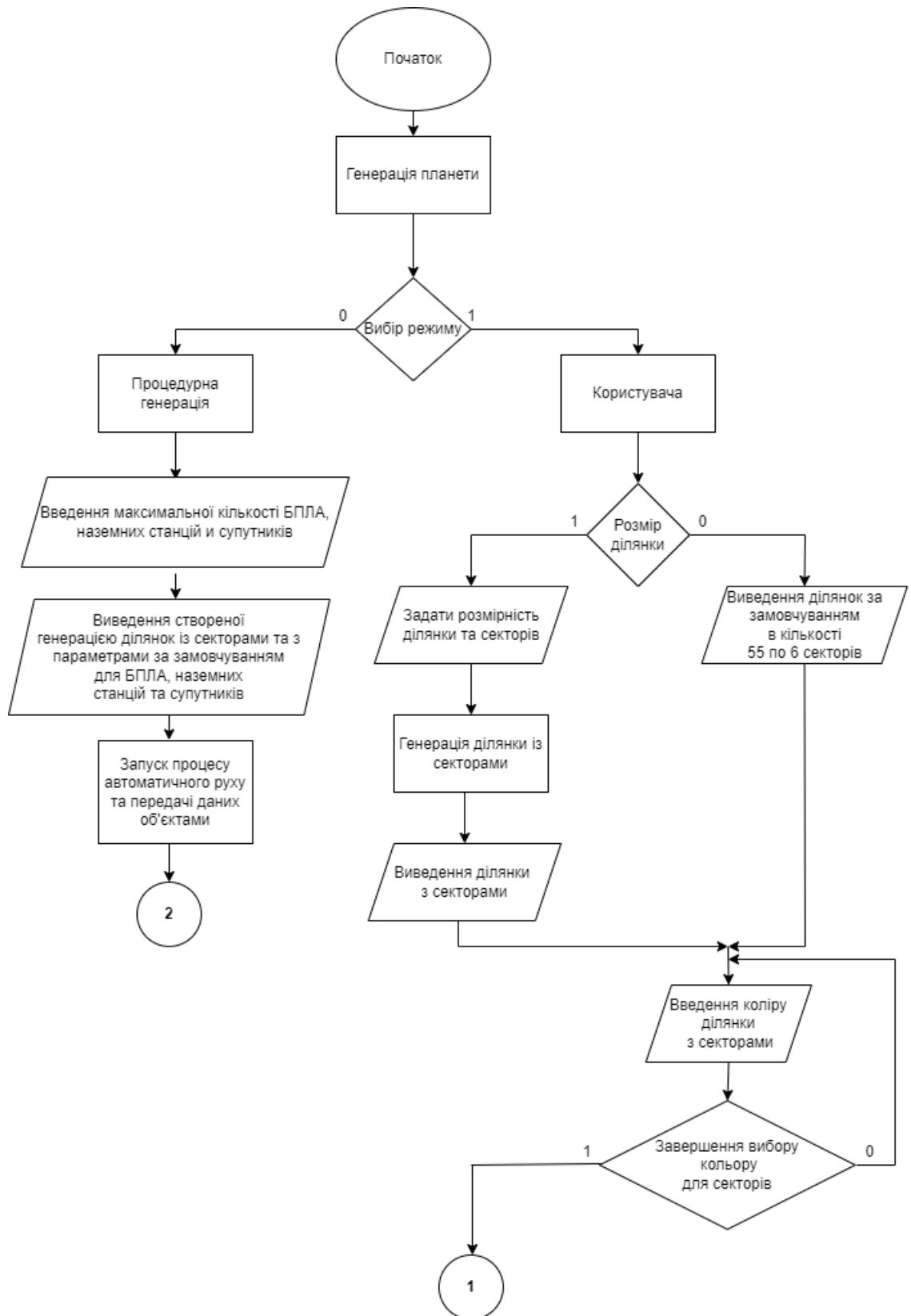


Рисунок 3.11 – Блок-схема роботи алгоритму

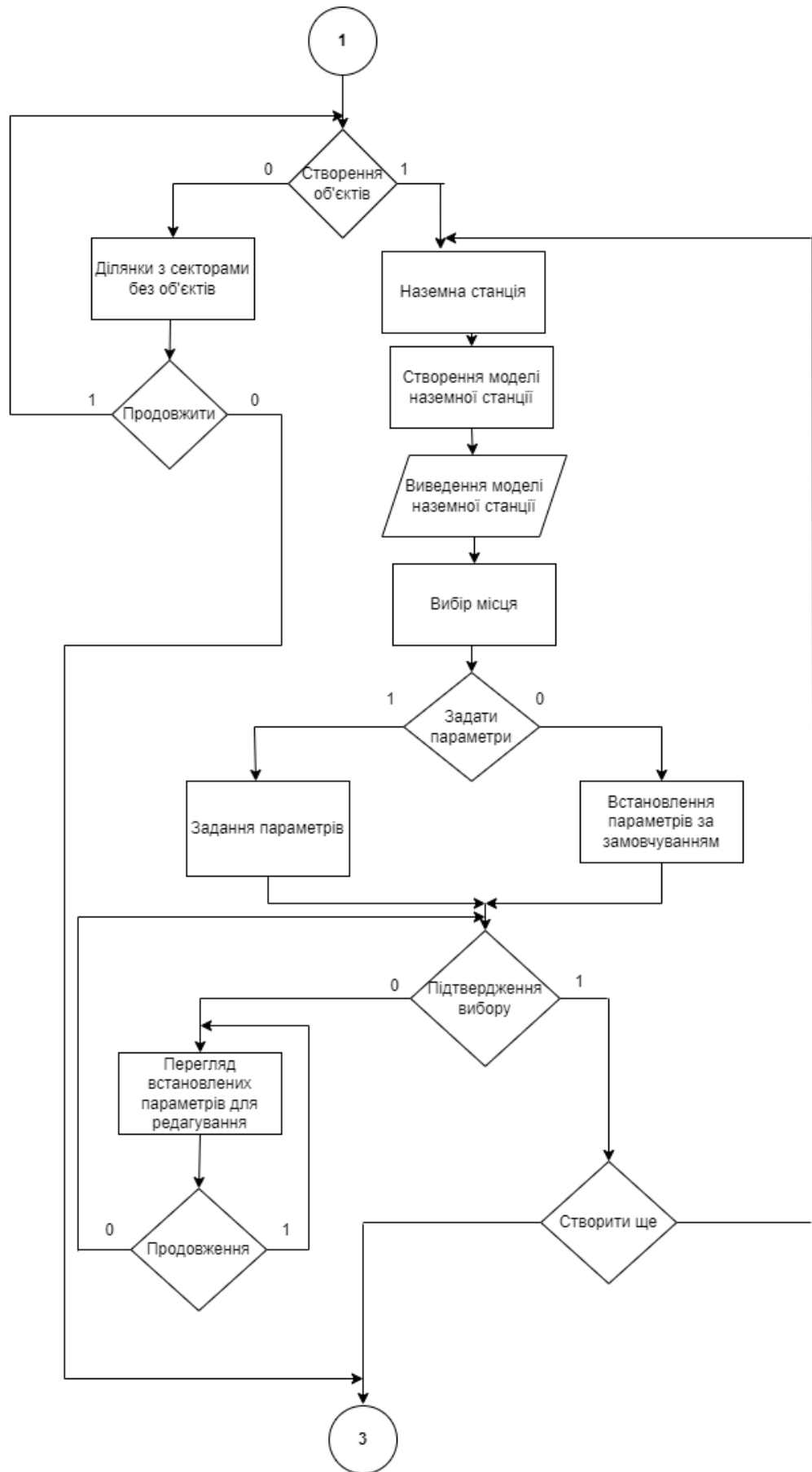


Рисунок 3.12 – Продовження

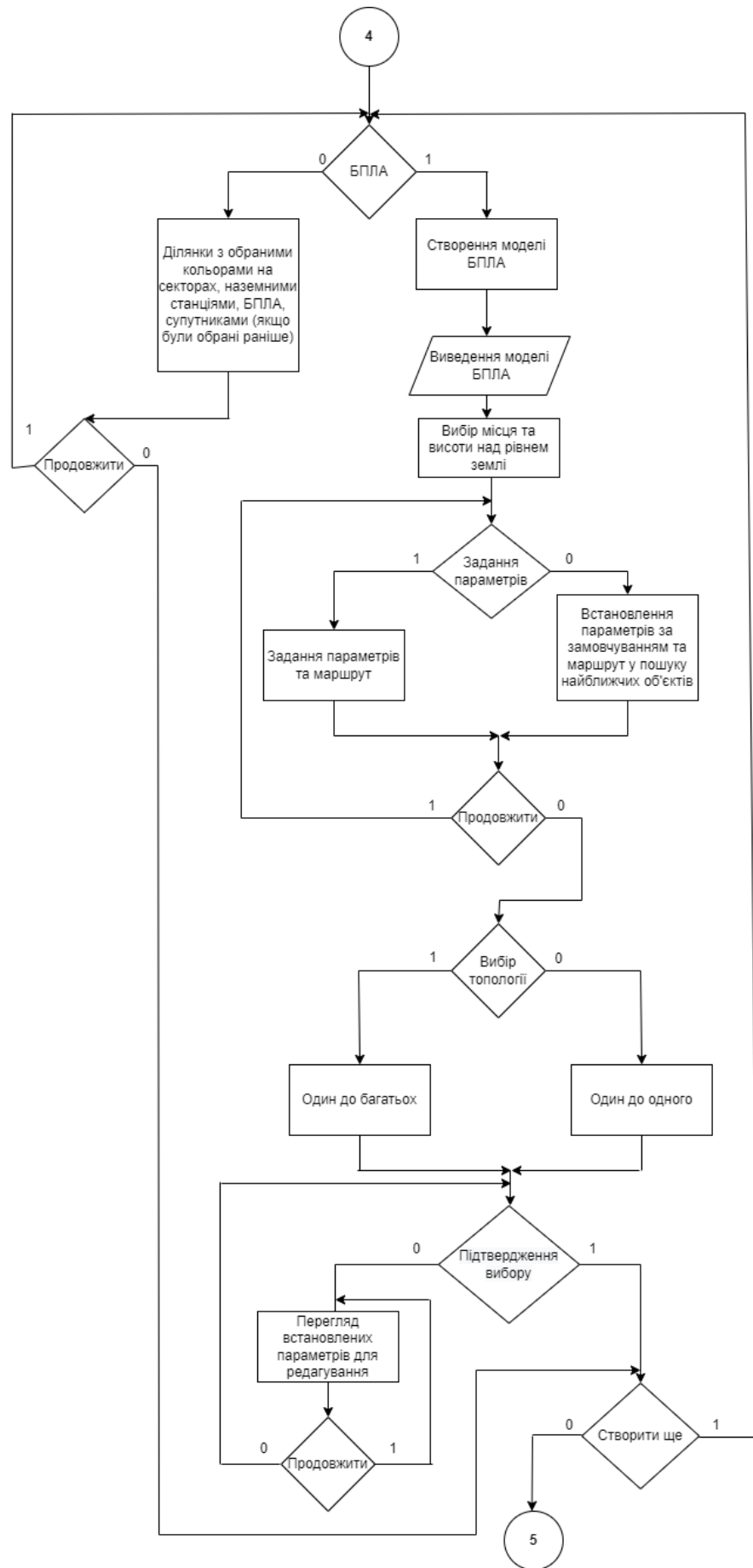


Рисунок 3.13 – Продовження

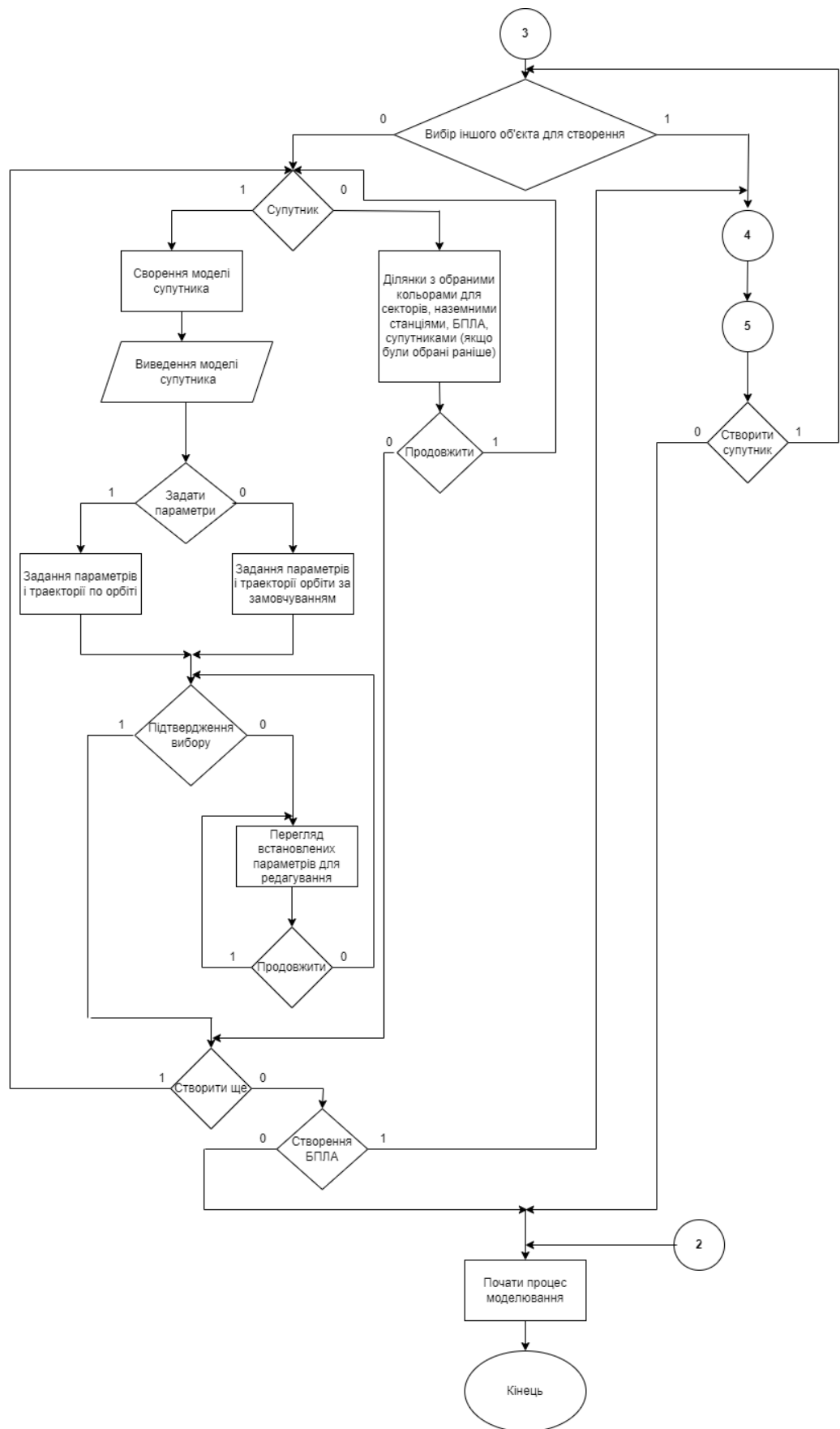


Рисунок 3.14 – Продовження

### 3.4 Основні моменти створення програми

Реалізація ділиться на 2 етапи.

1 Етап. Генерація планети.

2 Етап. Вибір користувачем об'єктів, генерація та налаштування їх.

#### 3.4.1 Встановлення необхідних залежностей

Алгоритм встановлення необхідних залежностей:

1 завантажити програмне середовище Visual Studio Code з офіційного сайту та ознайомитися з документацією [60];

2 завантажити Node.js (мінімально версії 14.0.0) з офіційного сайту та ознайомитись з документацією [61];

3 завантажити PowerShell (останньої версії) з офіційного сайту та ознайомитись з документацією [62];

4 створити папку для проекту:

– клікнути правою клавішою на папку і одночасно зажати клавішу Shift. У вікно, що з'явилося, обрати «Відкрити вікно PowerShell»;

– завантажити готовий шаблон React додатку та запустити його для перевірки коректності послідовністю команд.

```
npx create-react-app name_project  
cd my-app  
npm start
```

де в name\_project вказується бажане ім'я проекту.

5 завантажити Webpack для більш коретної роботи додатку та збору модулів з офіційного сайту та ознайомитсь з документацією [63].

Встановлення відбувається шляхом п. 4 і набору команди:

```
npm i -D webpack webpack-cli
```

Подивитися чи точно було встановлено можливо двома шляхами:

- 1 відповідним повідомленням в консолі;
- 2 відкриття файла `package.json` в корні проекту та перегляд залежностей.

Існує базовий алгоритм початкового налаштування Webpack, який можливо змінювати від потреб в стеку технологій:

- створити в корні проекту файл `webpack.config.js`;
- задати точку входу додатку (те що буде компілюватися) та точку виходу (куди компілювати).

### Лістинг 3.1 – Створення точки входу та виходу

```
const path = require('path')

module.exports = {
  entry: {
    main: path.resolve(__dirname, './src/index.js'),
  },
  output: {
    path: path.resolve(__dirname, './dist'),
    filename: '[name].bundle.js',
  },
}
```

- додати в файл `package.json` скрипт `build`.

```
"scripts": {
  "build": "webpack"
}
```

6 завантажити Babel (коретна роботи коду в старих версіях браузерів та перетворення синтаксису JSX в той, що зрозуміє браузер) з офіційного сайту та ознайомитися з документацією [64]. Встановлення відбувається шляхом п. 4 і набору команди.

```
npm install --save-dev babel-loader @babel/core
```

– у файл `webpack.config.js` додається конфігурація для Babel, яку можливо модифікувати:

### Лістинг 3.2 – Додавання Babel в `webpack.config.js`

```
module: {
  rules: [
    {
      test: /\.m?js$/,
      exclude: /node_modules/,
      use: {
        loader: "babel-loader",
        options: {
          presets: ['@babel/presets-env']
        }
      }
    }
  ]
}
```

- створити конфігураційний файл `babel.config.json` в корні проекту;
- виконати пункт 4 та ввести команду.

```
npm install @babel/preset-env --save-dev
```

- додати в файл `babel.config.json` скрипт `presets`.

```
{
  "presets": ["@babel/preset-env"]
}
```

7 завантажити `Three.js` з офіційного сайту та ознайомитися з документацією [65]. Виконати п. 4 та ввести команду:

```
npm install --save three
```

### 3.4.2 Перший етап реалізації

Перший етап реалізації – це генерація планети, а саме рендеринг та поява Землі. Етап ділиться на два підетапи. Фрагмент розробки наведений на лістингу 3.3. Загальна блок-схема в Додатку Б.

Перший підетап. Спочатку створюється елемент canvas, вихідне полотно, призначене для створення двомірного растрового зображення за допомогою скриптів, де буде відбуватися генерація та рендеринг. Тобто, створюється 2D площина, на якій буде будуватися 3D відображення. Відбувається реєстрація подій кліками комп'ютерної миші і створення об'єкту рендеру, який потім буде змінюватися. В залежності від DPI монітору змінюється співвідношення пікселів. У випадку коли  $DPI > 160$  встановлюється значення 2 для запобігання розмиттю зображень. Змінюється розмір вихідного полотна (ширина, висота) з урахуванням співвідношення пікселів пристрою, а також встановлюється область перегляду відповідно до цього розміру, починаючи з (0, 0). Створюються об'єкти перспективної камери та сцени. Для сцени створюється група для того щоб більш коректно групувати об'єкти на ній та взаємодіяти. Після цього задається позиція камери та створюється падіння світла на сцену. Останнє – створення сфери, тобто Землі на рисунку 3.15.

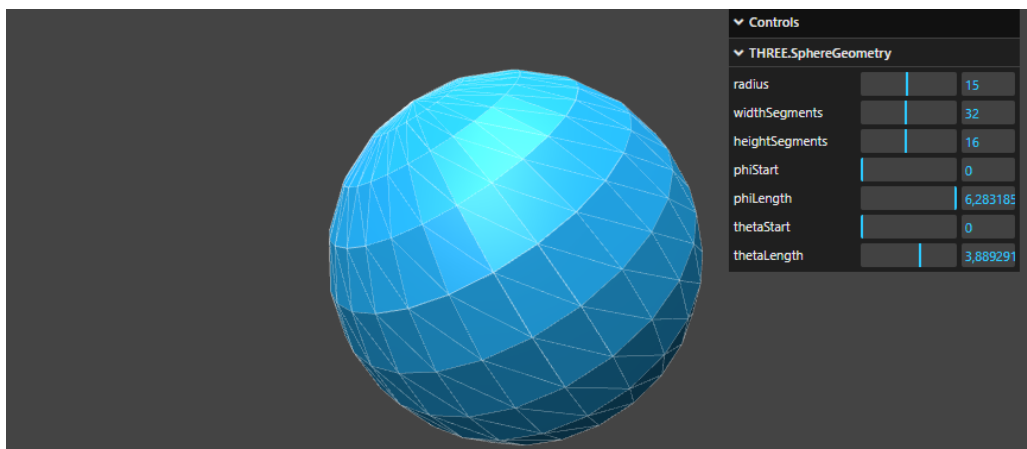


Рисунок 3.15 – Шаблон для редагування сфери

Другий підетап. Створення трикутних секторів шляхом сферичної лінійної інтерполяції SLERP. Модуль генерації об'єктів (БПЛА, наземної станції та супутника), де задаються параметри (радіус, швидкість руху, швидкість передачі даних, протокол / сигнал, кількість антен, час автономної роботи, кількість та розмір накопичувачів інформації), рух по осям, поява на сцені, проєціювання, рівні погодних умов (зелений, жовтий, оранжевий, червоний), режим роботи БПЛА (один до одного, один до багатьох), перешкоди (будівлі на шляху, електромагнітні, радіаційні), кольорова палітра на рисунку 3.16.

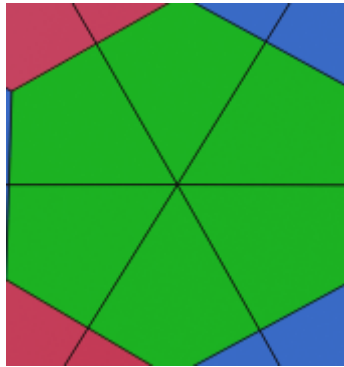


Рисунок 3.16 – Створена ділянка з обраними кольорами для секторів

Вид збоку створеної ділянки наведено на рисунку 3.17.

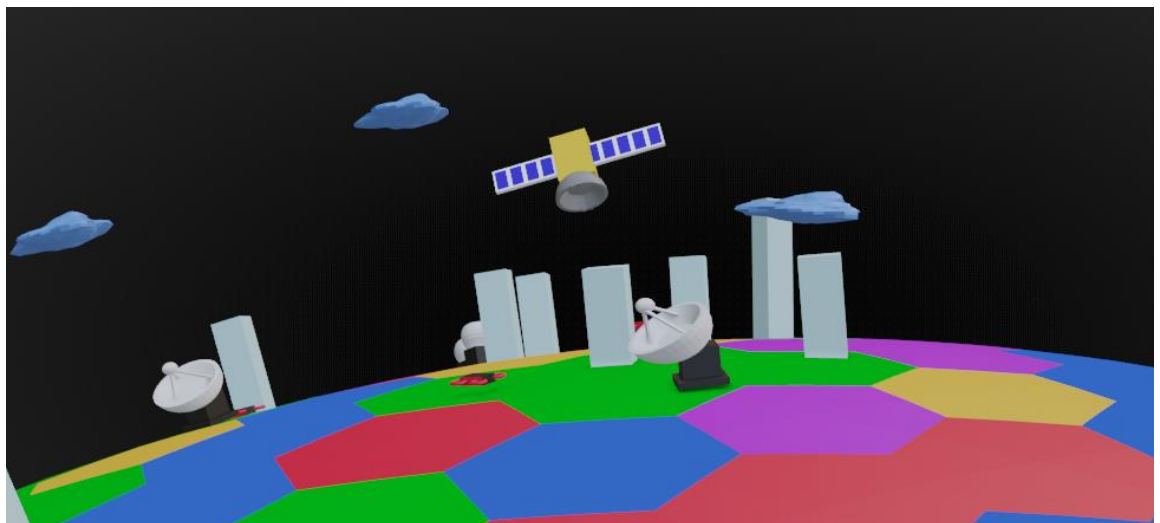


Рисунок 3.17 – Вигляд збоку створеної ділянки

Потужність прийнятого сигналу в умовах багатопроменевого поширення з урахуванням ефекту завмирання сигналу представляється через середнє значення потужності для застосування в людних місцях та на малих висотах. Для використання на висотах використовується розподіл Вейбулла і  $m$ -розподіл Накагамі. Говорячи про обладнання, слід відзначити антени, так як вузли мережі змінюються і використання тих же всеспрямованих антен має перевагу за рахунок більшої області охоплення. Між БПЛА та наземною станцією з високою швидкістю відбувається можливість передачі інформації і не залежати від стаціонарних систем зв'язку. Через природні чи техногенні причини передача не завжди здійснюється успішно, тому необхідно створити систему для моделювання та прийняття оптимальних рішень щодо передачі даних між об'єктами FANET-мережі. У даній версії сценарії прописуються вручну, але потім завдяки накопиченим даним, можливо використати глибоке машинне навчання для більш точного прогнозування та наслідків (гістограма на прикладі одного налаштування відображена на рисунку 3.18).

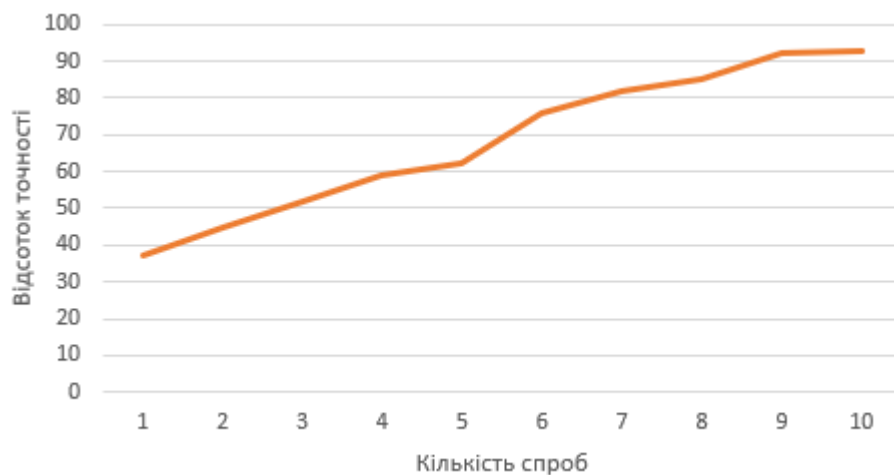


Рисунок 3.18 – Відношення кількості спроб до відсотку точності

### Лістинг 3.3 – Фрагмент розробки першого етапу

```
let canvas = document.getElementById('scena'); //створення площини
let width = window.innerWidth; // задання широти
let height = window.innerHeight; //задання висоти
```

```

let mouseClick = new THREE.Vector2(), INTERSECTED; //реєстрація подій
кліками

let renderedObj = new THREE.WebGLRenderer({
  canvas: canvas,
  antialias: true,
  alpha: true }); //створення рендерингу
renderer.setPixelRatio(window.devicePixelRatio > 1 ? 2 : 1); //
встановлення співвідношення пікселів пристрою
renderer.setSize(width, height);
let camera = new THREE.PerspectiveCamera(40, width / height, 1, 1000);
// Сцена
let scene = new THREE.Scene();
let group = new THREE.Group();
scene.add(group);
camera.position.set(0, -100, 10);
camera.lookAt(10, 20, 30);
let controls = new OrbitControls(camera, renderer.domElement);
let light = new THREE.AmbientLight(0x424242, 3);
scene.add( light );
let directionalLight = new THREE.DirectionalLight( 0xffffff, 0.5 );
scene.add( directionalLight );
let geometry = new THREE.SphereGeometry( 25, 132, 132 );
let material = new THREE.MeshPhongMaterial( {
  map: THREE.ImageUtils.loadTexture('img/earth-small.jpg'),
  displacementMap: THREE.ImageUtils.loadTexture('img/earthbump1k.jpg'),
  displacementScale: 10,
  // wireframe: true
} );
let sphere = new THREE.Mesh( geometry, material );
group.add(sphere);

```

### 3.4.3 Другий етап реалізації

Другий етап реалізації – це вибір користувачем об’єктів, генерація користувачу об’єктів та налаштування їх. Після генерації та рендерингу сфери (Землі) в браузерному вікні відображається сфера з космічним простором (темним кольором) та камерою, яка направлена на неї, з можливістю приближувати або змінювати ракурс на рисунку 3.18.

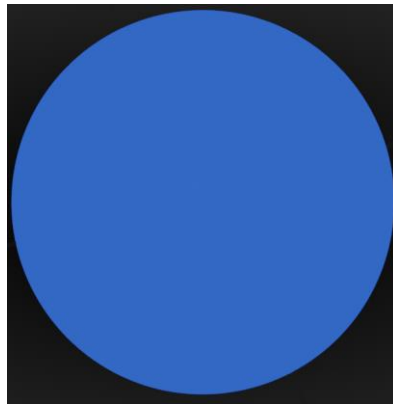


Рисунок 3.18 – Згенерована сфера

Далі користувач за допомогою модального вікна обирає режим генерації об'єктів сценарію (супутник, наземна станція, БПЛА). Приклад модальних вікон наведений на рисунках 3.19, 3.21, 3.23, 3.26. На рисунку 3.19 вибір режиму генерації: процедурний режим та користувацький режим.

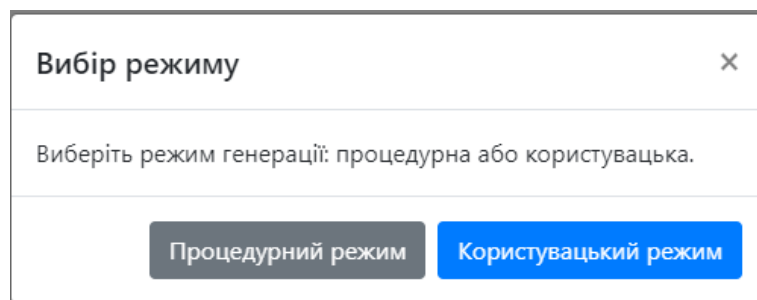


Рисунок 3.19 – Модальне вікно генерації

У випадку процедурного режиму відбувається перехід до іншого модального вікна, де користувач вводить кількість БПЛА, наземних станцій та супутників. Після чого вікно закривається і починається процедура генерації об'єктів на рисунку 3.20.

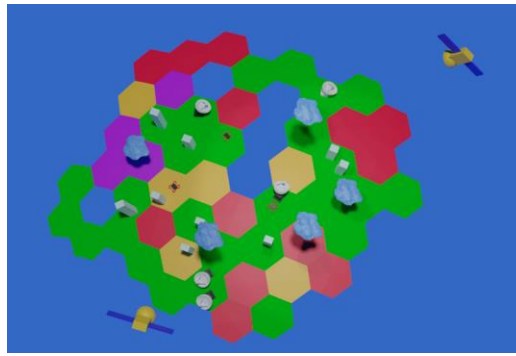


Рисунок 3.20 – Згенеровані ділянки з об'єктами

У випадку користувацького режиму, користувачу надається вибір розміру досліджуваної ділянки повзунком. Якщо значення 0 – відбудеться генерація ділянок за замовчуванням в кількості 55 по 6 секторів. Якщо більше 0, то кількість, яку вкаже користувач і генерація їх на поверхності сфери.

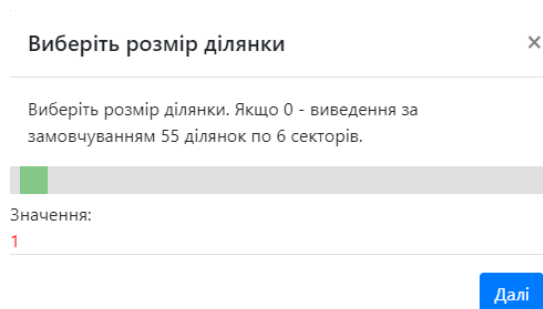


Рисунок 3.21 – Вибір розміру ділянки для дослідження сценарію

Після натискання кнопки «Далі» користувачу надається модальне вікно вибору кольорової палітри для кожного сектору (синій, червоний, зелений, жовтий, фіолетовий, білий). Після підтвердження починається робота з об'єктами. За замовчуванням, першим об'єктом є наземна станція (рисунки 3.22...3.23). Можливо в подальшому переробити з можливістю одразу вибирати між трьома об'єктами. Такий вибір був зроблений через незрозумілість в подальшому коректності роботи. Тобто, спочатку розробка велась для сценаріїв Супутник-Наземна станція, Супутник-Наземна станція-БПЛА, Наземна станція-БПЛА, БПЛА-БПЛА, БПЛА-Наземна станція-БПЛА.

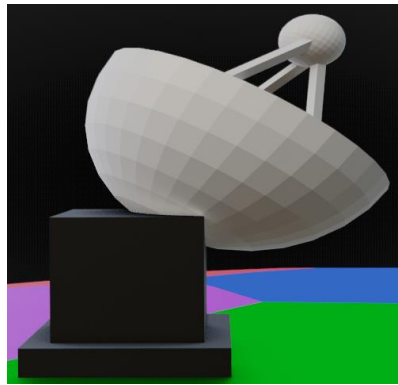


Рисунок 3.22 – Вигляд збоку наземної станції

Таким чином, після перевірки коретної роботи для багатьох сценаріїв можливо зробити декомпозицію об'єктів для більшої універсальності і меншої залежності всередині один від одного.



Рисунок 3.22 – Вигляд спереду

Для наземної станції вибирається місце для розміщення. Після розміщення відкривається модальне вікно для задання параметрів. Типове модальне вікно, яке буде змінюватися в залежності від об'єкту наведено на рисунку 3.23 (для БПЛА).

## Задання параметрів



Напишіть:

1. Радіус (м).
2. Швидкість руху (м/с).
3. Швидкість передачі даних (МБ/с).
4. Протокол / сигнал (назва).
5. Кількість антен.
6. Час автономної роботи (в хвилинах).
7. Кількість накопичувачів інформації (шт).
8. Розмір накопичувачів інформації (МБ).

Радіус:	<input type="text"/>
Швидкість руху:	<input type="text"/>
Швидкість передачі даних:	<input type="text"/>
Кількість антен	<input type="text"/>
Час автономної роботи:	<input type="text"/>
Кількість накопичувачів інформації	<input type="text"/>
Розмір накопичувачів інформації:	<input type="text"/>

Далі

Рисунок 3.23 – Модальне вікно налаштування параметрів для БПЛА

У випадку коли не буде введено ніяких даних або деяких з них, то порожні поля приймуть значення за замовчування. Якщо будуть введені некоретно дані, то поле для даних стане черновим. Прототипом для значень за замовчування було обрано супутник Iridium Next, зображений на рисунках 3.24, 3.25.

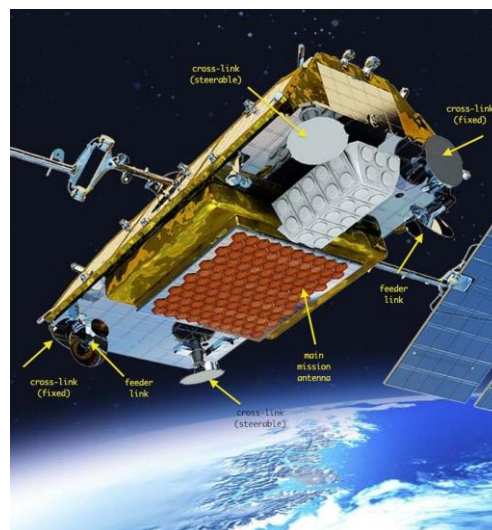


Рисунок 3.24 – Супутник Iridium Next

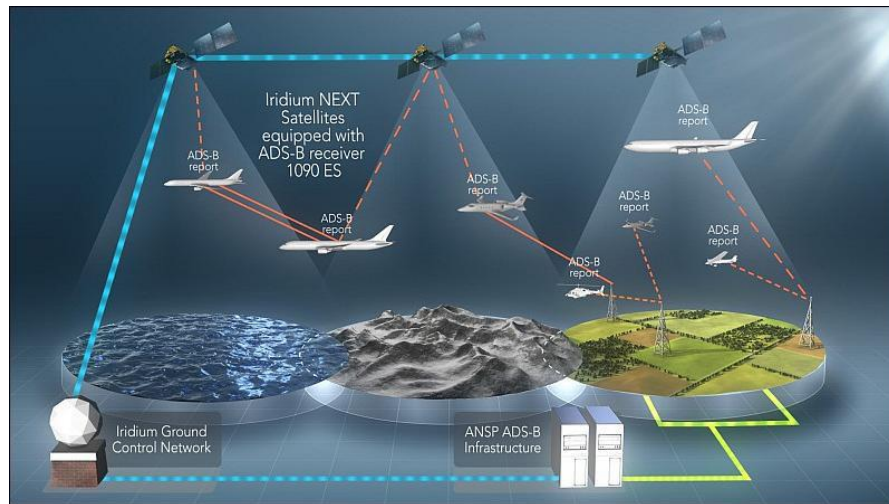


Рисунок 3.25 – Сценарії передачі даних у супутнику Iridium Next

При кліку на кнопку «Далі» відкриється інше типове модальне вікно підтвердження вибору на рисунку 3.26. Якщо вибір не підтверджений, то відбувається повернення до модального вікна з параметрами для перегляду і редагування.

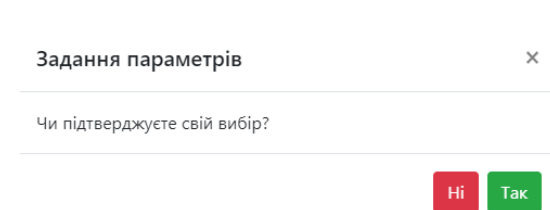


Рисунок 3.26 – Модальне вікно підтвердження вибору

Нарешті, коли вибір підтверджений, виникає модальне вікно з питанням чи треба створити ще об'єкт, тобто збільшити кількість їх на сфері, на рисунку 3.27.

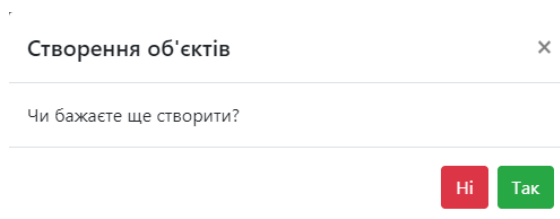


Рисунок 3.27 – Модальне вікно створення об'єктів

Як буде налаштовані наземні станції, відбувається вибір (модальне вікно) між створенням супутників (рисунки 3.28, 3.29) та БПЛА.

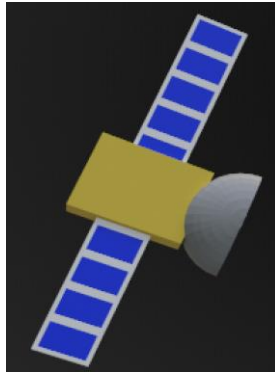


Рисунок 3.28 – Вигляд збоку супутника

Процес створення супутника схожий з наземною станцією з деякими відмінностями. Генерується модель, виводиться на сферу, користувач задає параметри, але при цьому ще задає траєкторію за якою буде рухатися об'єкт і вибір чи створити ще об'єкт.



Рисунок 3.29 – Вигляд спереду супутника

У випадку коли було обрано «Ні», то відбувається перехід до створення БПЛА на рисунках 3.30, 3.31. Якщо користувач не має бажання створювати, то залишається ділянка з тими об'єктами та секторами, які були раніше. Щоб точно переконатися у виборі користувача з'явиться модальне вікно підтвердження вибору як на рисунку 3.26. У випадку коли користувач точно не хоче продовжувати починається третій етап.



Рисунок 3.30 – Вигляд збоку БПЛА

У моделі БПЛА поки що відсутні візуально антени через складність реалізації. Тому в даній версії додатка вони відсутні. Проблема виникла через масштабування кількості антен і коректного додавання до об'єкту. Дана проблема не є фатальною, оскільки технічно об'єкт виконує свої функції і це не позначається на передачі даних.

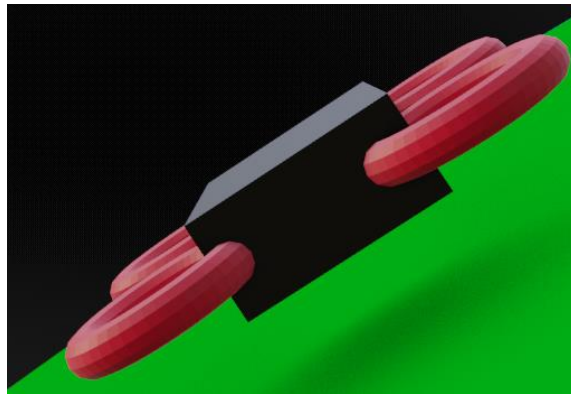


Рисунок 3.31 – Вигляд спереду БПЛА

Послідовність дії щодо створенні БПЛА відбуваються так само, як і у випадку супутника, зі своїми відмінностями. Генерація моделі, виведення на сферу, вибір місця розташування, задання параметрів, вибір топології і вибір створення ще об'єктів. Вибір топології має на увазі передачу даних «точка-точка» або «точка-багатоточка». У випадку першого, при знаходженні одного або декількох БПЛА, передача даних відбувається лише тому, який знаходиться ближче шляхом віднімання радіусів об'єктів. У випадку коли в колі зору знаходиться наземна станція і маршрут був до неї, то пріоритет передачі даних віддається їй, а не БПЛА. У випадку другого, передача даних відбувається декільком БПЛА одночасно. Після підтвердження вибору починається моделювання сценарію.

## ВИСНОВКИ

В результаті роботи був проведений аналіз, де було встановлено актуальність теми, її чітке розуміння, ознайомлено з класифікаціями та визначенням FANET, основні компоненти й процеси і взаємодії їх між собою, вирішуючі завдання. Результатом роботи є створення методу автоюстування антен вузлів FANET-мережі при передачі Big Data, який можливо модифікувати або змінювати.

Для програмної реалізації методу автоюстування було визначено існуючі програмні засоби, які б могли вирішувати завдання конкретного компонента або частин. Проведено огляд їх основних можливостей, які можливо використати.

Таким чином, був розроблений новий метод автоюстування антен вузлів FANET-мережі, який б задовольняв стрімкий розвиток даної предметної області, але при цьому був легким в розумінні та включав процедуру адаптації під різні сценарії.

Кваліфікаційна робота має подальший розвиток: створення візуального відображення створених моделей, а не застосування шаблонних моделей, застосування глибокого машинного навчання для побудови сценаріїв, більш глибока декомпозиція об'єктів, можливість змінити сценарій в реальному часі. Реалізований метод буде актуальним і матиме широку сферу застосування: використання в побудові сценаріїв моделювання передачі даних, на основі яких будуть будуватися ефективні фізичні реалізації.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Hayat S., Yanmaz E., Bettstetter C., Christian C. Experimental analysis of multipoint-to-point UAV communications with IEEE 802.11n and 802.11ac [Електронний ресурс] // IEEE. – 2015. – Режим доступу: [www / URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7343625](http://www.ieee.org). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.
2. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing [Електронний ресурс] // ScienceDirect. – 2018. – Режим доступу: [www / URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870517301671](http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870517301671). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.
3. Gerasimenko O. V., Elenin L. V., Tkachev V. N., Buchanko A. N., Savanevich V. E., Jazliev V. S. Web service the control of results of processing the data in specialized computing systems // The Strategies of Modern Science Development: International scientific-practical conference. Science Book Publishing House, Yelm, WA, USA, 29-30 March 2013. – P. 10-13.
4. Tkachov V.M. Automated Controllers Functioning Criteria in Content Distribution Systems / V.M. Tkachov, V.E. Savanevych // Scholars Journal of Engineering and Technology. - Volume-2: Issue-3A. - Apr-May; 2014. - Pp. 491-497.
5. Саваневич В.Е. Метод передачи данных с промежуточным хранением / В.Е. Саваневич, В.Н. Ткачев // Системы обработки информации: сборник научных трудов. - Х.: ХУВС им.Ивана Кожедуба, 2014. - Вып. 7 (123). - С. 99-105.
6. Ткачев В.Н. Разработка метода передачи данных с промежуточным хранением / В.Н. Ткачев, В.Е. Саваневич // 5 Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2014). - Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. - Т.2. - 14-

17 октября 2014 г. - С.157-159.

7. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією [Текст] : пат. 118921 Україна: МПК 2017.01, H04W 64/00, H04W 84/18 (2009.01), G06F 17/40 (2006.01) / Ткачов В.М., Токарев В.В., заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – и 2017 04085; заяв. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017, бюл. № 16. – 2017 – 5 с.

8. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережеских систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ-випромінення [Текст]: вик. НДР / Харківський національний університет радіоелектроніки; керівн. Чурюмов Г.І., вик. Токарев В.В., ..., Ткачов В.М. [та ін.]. – Х.: 2017. – № держреєстрації 0117U003916.

9. Ткачов В.М. Проблема передачі даних типу Big Data у мобільній системі «мультикоптер-сенсорна система» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, 2017. – № 2 (42). – С. 154-157.

10. Ткачов В.М. Модифікація моделі підсистеми проміжного зберігання в умовах відсутності апіорної інформації про характер Big Data / В.М. Ткачов / Телекомунікаційні та інформаційні технології – 2017, – №2. – С. 87-97.

11. Ткачов В.М. Метод передачі даних в комп'ютерній мережі проміжного зберігання даних складної інформаційної системи / В.М. Ткачов // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, 2017. – № 3 (43). – С. 117-119.

12. Радченко В.А. Мобильная подсистема «Мультикоптер – сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.А. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Полтавський національний технічний університет ім. Ю.

Кондратюка, 2017. – № 4 (44). – С. 102-105.

13. Ruban I.V. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / Igor V. Ruban, Genadiy I. Churyumov, Volodymyr V. Tokarev, Vitaliy M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2017). - CEUR Workshop Processing. - Kyiv, Ukraine, November 30, 2017. - Pp. 105-111.

14. Ткачов В.М. Підвищення живучості мережної складової рою БПЛА / В.М. Ткачов, Д.Є. Мітін, Я.В. Дух // Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі. Матеріали XI Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (21-23 березня 2018 р.). – Кривий Ріг: ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2018. – С. 98-100.

15. Churyumov G. Scenario of Interaction of the Mobile Technical Objects in the Process of Transmission of Data Streams in Conditions of Impacting the Powerful Electromagnetic Field / G. Churyumov; V. Tokarev; V. Tkachov; S. Partyka // 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP). – 21-25 Aug. 2018. – Pp. 183-186.

16. Tkachov V.M. Shortest Path Bridging Method For the Group of Mobile Technical Objects / V.M. Tkachov, V.V. Tokarev, G.I. Churyumov // Восьма міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». – Полтава-Баку-Харків-Жиліна. – 26-27 квітня 2018 р. – С. 18.

17. Tkachov Vitalii Method of Data Collection in Wireless Sensor Networks Using Flying Ad Hoc Network / Vitalii Tkachov, Volodymyr Tokariev, Yana Dukh, Vadym Volotka // 2018 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology, October 9-12, 2018 Kharkiv, Ukraine. – Pp. 197–201.

18. Ткачов В.М. Застосування технології hub-spoke manet для координації відокремлених сегментів FANET-мережі / В.М. Ткачов, В.В. Водолазкий, Д.Є. Мітін // Шоста міжнародна науково-технічна конференція

«Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельсько-Бяла-Харків. – 14-16 листопада 2018 р. – С. 28.

19. Ткачов В.М. Особливості передачі великих масивів даних в FANET-мережі з використанням протоколу JSERIAL (архітектура JAUS) / В.М. Ткачов, Д.О. Цуріков, А.Ю. Фролов // Шоста міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації». – Черкаси-Баку-Бельсько-Бяла-Харків. – 14-16 листопада 2018 р. – С. 28.

20. Churyumov G.I. Method for Ensuring Survivability of Flying Ad-hoc Network Based on Structural and Functional Reconfiguration / G.I. Churyumov, V.M. Tkachov, V.V. Tokarev, V.O. Diachenko // Информационные технологии и безопасность. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции ИТБ-2018. – ИПРИ НАНУ, 2018. – 12 с.

21. Ткачов В.М. Формалізація станів FANET-мережі із застосуванням апарату мережі Петрі / В.М. Ткачов, В.В. Водолазький, В.С. Волотка // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 34)" / Збірник тез доповідей: випуск 34 (м. Тернопіль, 11 грудня 2018 р.). – Частина 1. – Тернопіль. – 2018. – 82-83 с.

22. Ткачов В.М. Формалізація задачі розподілу мережних ресурсів високодинамічної FANET-мережі в нестаціонарних умовах / В.М. Ткачов, О.Є. Кошедран // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 34)" / Збірник тез доповідей: випуск 34 (м. Тернопіль, 11 грудня 2018 р.). – Частина 1. – Тернопіль. – 2018. – 85-86 с.

23. Ткачов В.М. Аналіз ефективності застосування протоколу multi-link AODV у FANET-мережі / В.М. Ткачов, В.В. Водолазький // 73-я науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів ОНАЗ ім. О.С. Попова, 12-14 грудня 2018 року. – Одеса. – 2018. – С. 81-83.

24. Paparazzi-UAV [Електронний ресурс] // Paparazzi. – 2016. – Режим доступу: [www / URL: https://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main\\_Page](http://www.paparazziuav.org/wiki/Main_Page). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

25. Ткачов В.М. Застосування FANET-мережі у якості мережі збереження даних / В.М. Ткачов, О.Є. Кошедран, В.С. Волоotka // 73-я науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів ОНАЗ ім. О.С. Попова, 12-14 грудня 2018 року. – Одеса. – 2018. – С. 83-84.

26. Churyumov Genadiy Method for Ensuring Survivability of Flying Ad-hoc Network Based on Structural and Functional Reconfiguration / Genadiy Churyumov, Vitalii Tkachov, Volodymyr Tokariiev, Vladyslav Diachenko // Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018) / Kyiv, Ukraine, November 27, 2018. – Pp. 64-76.

27. Ткачов В.М. Застосування стандарту IEEE 802.11ad в FANET-мережі / В.М. Ткачов, В.В. Водолазкий, В.С. Волоotka // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 34)" / Збірник тез доповідей: випуск 35 (м. Тернопіль, 5 лютого 2019 р.). – Частина 1. – 2019. – 35-36 с.

28. Ткачов В.М. Використання 4G-мережі у якості середовища передачі даних між вузлами FANET-мережі в міських умовах / В.М. Ткачов, О.Є. Кошедран // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 34)" / Збірник тез доповідей: випуск 35 (м. Тернопіль, 5 лютого 2019 р.). – Тернопіль. – 2019. – 38-39 с.

29. Tkachov V.M. Improving Reliability Of Fanet With Time Reservation / V.M. Tkachov, V.V. Vodolazkyi, V.S. Volotka // Матеріали XII Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (20-22 березня 2019 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2019. – 3-5 с.

30. Ткачов В.М. Застосування Fog-технологій в FANET-мережах/ В.М. Ткачов, А.О. Карасьов, О.Є. Кошедран // Матеріали XII Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (20-22 березня 2019 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2019. – 112-114 с.

31. Ткачов В.М. Місце FANET-мереж в концепції «Розумне місто» / В.М. Ткачов, Ю.В. Шурінов // Дев'ята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». – Баку-Харків-Жиліна. – 11-12 квітня 2019 р. – С. 46.

32. Mathar R., Niessen T. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks [Електронний ресурс] // SpringerLink. – 2000. – Режим доступу: [www / URL: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1019263308849](https://link.springer.com/article/10.1023/A:1019263308849). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

33. Tutschku K. Demand-based Radio Network Planning of Cellular Mobile Communication Systems [Електронний ресурс] // IEEE. – 1998. – Режим доступу: [www / URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/662915](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/662915). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

34. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage [Електронний ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступу: [www / URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7486987](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7486987). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

35. Han Z., Swindlehurst A.L., Liu K.J.R. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles [Електронний ресурс] // IEEE. – 2009. – Режим доступу: [www / URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4787021](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4787021). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

36. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [Електронний ресурс] // IEEE. – 2014. – Режим доступу:

www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6863654>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

37. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis [Электронный ресурс] // IEEE. – 2015. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7417609>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

38. Azari M.M., Rosas F., Chen K.C., Pollin S. Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial communication in presence of fading [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7842099/>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

39. Fadlullah Z.M., Takaishi D., Nishiyama H., Kato N., Miura R. A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-aided networks [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7389838>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

40. Gruber M. Role of altitude when exploring optimal placement of UAV access points [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7565073>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

41. Lyu J., Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7762053/>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

42. Sanchez-Garcia J., Garcia-Campos J.M., Toral S.L., Reina D.G., Barrero F. A Self Organising Aerial Ad Hoc Network Mobility Model for Disaster Scenarios [Электронный ресурс] // IEEE. – 2015. – Режим доступа: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7563610>. – 25.03.2022 –

Загол. з экрану.

43. Chen J., Gesbert D. Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach [Электронный ресурс] // IEEE. – 2017. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7996921>. – 25.03.2022 – Загол. з экрану.

44. Chetlur Ravi V.V., Dhillon H.S. Downlink coverage probability in a finite network of unmanned aerial vehicle (UAV) base stations [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7536859>. – 25.03.2022 – Загол. з экрану.

45. Sharma V., Bennis M., Kumar R. UAV-Assisted Heterogeneous Networks for Capacity Enhancement [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7451189>. – 25.03.2022 – Загол. з экрану.

46. Oubbatia O.S., Lakas A., Zhouc M., Güne M.B., Yagoubia F. A survey on position-based routing protocols for Flying Adhoc Networks (FANETs) // Vehicular Communications, 10, Elsevier, 2017, pp. 29–56

47. Friis H.T. A Note on a Simple Transmission Formula [Электронный ресурс] // IRE. – 1946. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: [https://carpmino.ece.wisc.edu/carpmino\\_papers/friis\\_original\\_1946.pdf](https://carpmino.ece.wisc.edu/carpmino_papers/friis_original_1946.pdf). – 25.03.2022 – Загол. з экрану.

48. Holis J., Pechac P. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas [Электронный ресурс] // IEEE. – 2008. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4483593/>. – 25.03.2022 – Загол. з экрану.

49. Cai X., Gonzalez-Plaza A., Alonso D., Zhang L., Rodriguez C.B., Yuste A.P., Yin X. Low altitude UAV propagation channel modelling [Электронный ресурс] // IEEE. – 2017. – Режим доступа: [www](http://www) / URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7928479/>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

50. Amorim R., Nguyen H., Mogensen P., Kovács I.Z., Wigard J., Sørensen T.B. Radio Channel Modeling for UAV Communication over Cellular Networks [Электронный ресурс] // IEEE. – 2017. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7936620>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

51. Matolak D.W., Sun R. Air-ground channels for UAS: Summary of measurements and models for L- and C-bands [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7486380>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

52. Khawaja W., Guvenc I., Matolak D. UWB channel sounding and modeling for UAV air-to-ground propagation channels [Электронный ресурс] // IEEE. – 2016. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7842372/>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

53. Jung Y., Kang Y., Son K. Air-Ground Channel Model Selection Method for UAS Communications Using Digital Elevation Data [Электронный ресурс] // IEEE. – 2017. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7993758/>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

54. Daniel K., Putzke M., Dusza B., Wietfeld C., Models A.A.C. Three Dimensional Channel Characterization for Low Altitude Aerial Vehicles [Электронный ресурс] // IEEE. – 2010. – Режим доступа: [www](http://www) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5624356>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

55. Yanmaz E., Kuschnig R., Bettstetter C. Channel measurements over 802.11a-based UAV-to-ground links [Электронный ресурс] // IEEE. – 2012. – Режим доступа: [www](http://www) / URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6162389>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

56. Matolak D.W., Sun R. Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems: The Over-Freshwater Setting [Электронный ресурс] // IEEE. – 2014. – Режим доступа: [www](http://www.ieee.org) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6819996>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

57. Cheng C., Hsiao P., Kung H., Vlah D. Performance Measurement of 802.11a Wireless Links from UAV to Ground Nodes with Various Antenna Orientations [Электронный ресурс] // IEEE. – 2006. – Режим доступа: [www](http://www.ieee.org) / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4067672>. – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

58. Techdata: MQMaker WiTi Board v 2.0 / 512MB [Электронный ресурс] // OpenWrt. – Режим доступа: [www](http://www.openwrt.org) / URL: [https://openwrt.org/toh/hwdata/mqmaker/mqmaker\\_witi\\_board\\_512mb](https://openwrt.org/toh/hwdata/mqmaker/mqmaker_witi_board_512mb). – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

59. R. Koch Electromagnetic Characteristics of Small Loop Antennas on Rectangular platforms, Master's thesis, Marquette University, Milwaukee, WI, 2002.

60. Documentation for Visual Studio Code [Электронный ресурс] // Microsoft. – Режим доступа: [www](http://www.microsoft.com) / URL: <https://code.visualstudio.com/> – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

61. Documentation for Node.js [Электронный ресурс] // Node.js Foundation. – Режим доступа: [www](http://www.nodejs.org) / URL: <https://nodejs.org/uk/docs/> – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

62. Documentation for PowerShell [Электронный ресурс] // Microsoft. – Режим доступа: [www](http://www.microsoft.com) / URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/powershell/> – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

63. Documentation for Webpack [Электронный ресурс] // Webpack. – Режим доступа: [www](http://www.webpack.js.org) / URL: <https://webpack.js.org/concepts/> – 25.03.2022 –

Загол. з екрану.

64. Documentation for Babel [Електронний ресурс] // Babel. – Режим доступу: www / URL: <https://babeljs.io/docs/en/> – 25.03.2022 – Загол. з екрану.

65. Documentation for Three.js [Електронний ресурс] // Three.js. – Режим доступу: www / URL: <https://threejs.org/manual/#en/fundamentals> – 25.03.2022 –

Загол. з екрану.