

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 передачі даних з попередньою обробкою на  
вузлах високомобільної комп'ютерної мережі

(тема)

Виконав:

студент \_\_\_\_\_ II курсу, групи \_\_\_\_\_ КСМм-21-1  
Яхно В.О.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма \_\_\_\_\_  
Комп'ютерні системи та мережі  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: \_\_\_\_\_ доц. Ткачов В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

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

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерні системи та мережі \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту \_\_\_\_\_ Яхно Владиславу Олеговичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод передачі даних з попередньою обробкою на вузлах високомобільної комп'ютерної мережі

затверджена наказом по університету від “ 07 ” листопада 2022 р. № 1453Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 13 грудня 2022 р.

3. Вхідні дані до роботи комп'ютер – 1 шт.;

процесор intel core m3 – 1 шт.;

відеокарта intel hd graphics 515 – 1 шт.;

оперативна пам'ять ddr3 8gb – 1 шт.;

роутер Huawei ax3 dual core – 1 шт.;

безперебійне підключення ethernet – 1 шт.

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

Вступ.

1. Особливості передачі відеоданих у комп'ютерній мережі

2. Технології побудови системи передачі даних

3. Проектування та розробка методу передачі даних на вузлах високомобільної мережі

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 кваліфікаційної роботи.	07.11.22 – 08.11.22	
2	Постановка задачі та розробка плану роботи.	09.11.22 – 10.11.22	
3	Пошук літератури за темою роботи.	11.11.22 – 12.11.22	
4	Огляд технологій передачі FANET	13.11.22 – 15.11.22	
5	Огляд особливостей обміну даними	16.11.22 – 25.11.22	
6	Проектування методу передачі даних	26.11.22 – 03.12.22	
7	Складання висновків.	03.12.22 – 07.12.22	
8	Оформлення презентації та звіту	07.12.22 – 12.12.22	

Дата видачі завдання 07 листопада 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 73 с., 25 рис., 3 табл., 56 джерел.

КОМП'ЮТЕРНА МЕРЕЖА, БПЛА, WLAN, АТМ, ВІДЕОДАННІ, СТИСНЕННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є метод передачі даних з попередньою обробкою на вузлах вискомобільної комп'ютерної мережі з ідеальним балансуванням між стисненням та затримкою передачі відеоданих.

У ході виконання кваліфікаційної роботи були розглянуті технології системи передачі даних, алгоритм для маршрутизації та параметри стиснення відеоданих.

## ABSTRACT

Master's thesis: 73 pages, 25 figures, 3 tables, 56 sources.

MEREG COMPUTER, UAV, WLAN, ATM, VIDEO DATA, STAMPING.

The major goal of this thesis is a method of data transmission with pre-processing on the nodes of a high-speed mobile computer network with an ideal balance between compression and delay of video data transmission.

In order to technologies of the data transmission system, routing algorithm and video data compression parameters were considered.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП .....	10
1 ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОДАНИХ У КОМП'ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ .....	11
1.1 Основна характеристика відеоданих.....	11
1.2 Технології передачі даних з мінімальною втратою даних.....	13
1.3 Бездротові технології передачі даних .....	16
2 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ.....	18
2.1 Застосування алгоритму бджолоїної колонії BeeAdHoc для маршрутизації у FANET .....	18
2.1.1 Бджолині алгоритми .....	19
2.1.2 Самоорганізовані мережі БПЛА.....	20
2.1.3 Алгоритми та методи маршрутизації у FANET.....	21
2.1.4 Маршрутизація в мережі, що самоорганізується, на основі алгоритмів бджолоїної колонії .....	22
2.1.5 Сценарій проведення імітаційного моделювання .....	24
2.1.6 Імітаційне моделювання.....	26
2.2 Аналіз сучасних стандартів стиску відеоданих .....	31
2.2.1 Перелік стандартів стиснення відеоданих.....	32
3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА ВУЗЛАХ ВИСОКОМОБІЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ .....	37
3.1 Від одиночних БПЛА до груп та комплексів.....	37
3.2 Метод роевої взаємодії .....	38
3.3 Вирішення поставлених завдань .....	42
3.4 Система зв'язку передачі даних .....	46
ВИСНОВКИ.....	59

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	60
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний пристрій

ДКП – дискретне комплексне перетворення

СЗД – система зберігання даних

АТМ – асинхронний режим передачі (англ., Asynchronous Transfer Mode)

АPS – аналогова система захисту (англ., Analog Protection System)

CAI – комп'ютерне навчання (англ. Computer-Aided [or Assisted] Instruction)

FANET – мережа літальних апаратів (англ., Flying Ad Hoc Network)

GPS – система глобального позиціонування (англ., Global Positioning System)

ISO – організація з міжнародних стандартів (англ., International Organization for Standardization)

IEC – міжнародна електротехнічна комісія (англ., International Electrotechnical Commission)

JPEG – один із популярних растрових графічних форматів (англ., Joint Photographic Experts Group)

SIF – визначений у стандарті MPEG-1 формат зберігання та передачі цифрового відео (англ., Source Input Format)

MANET – бездротові децентралізовані мережі (англ., Mobile Ad Hoc Network)

MPEG – експертна група з зображень, що рухаються (англ., Moving Picture Experts Group)

WPAN – бездротові персональні мережі (англ., Wireless Personal Area Networks)

WMAN – бездротові мережі масштабу міста (англ., Wireless

Metropolitan Area Networks)

WWAN – бездротові глобальні мережі (англ., Wireless Wide Area Network)

VANET – автомобільні мережі, що самоорганізуються (англ., Vehicular Ad Hoc Network)

HDV – стандарт запису відео високої чіткості (англ., high definition video)

VLC – коди змінної довжини (англ., Variable Length Codes)

## ВСТУП

Комп'ютерні мережі, звані також обчислювальними мережами, або мережами передачі даних, є логічним результатом еволюції двох найважливіших науково-технічних галузей сучасної цивілізації – комп'ютерних і телекомунікаційних технологій. З одного боку, мережі є окремим випадком розподілених обчислювальних систем, в яких група комп'ютерів узгоджено виконує набір взаємопов'язаних завдань, обмінюючись даними в автоматичному режимі. З іншого боку, комп'ютерні мережі можуть розглядатися як засіб передачі інформації на великі відстані, для чого в них застосовуються методи кодування та мультиплексування даних, що отримали розвиток у різних телекомунікаційних системах.

В кваліфікаційній роботі ставиться завдання методу за яким буде передавати інформація, що включає відео з мінімальною затримкою, включаючи методи стиснення.

Таким чином, основною метою роботи є знаходження балансу між стиском та затримкою передачі відеоданих у комп'ютерній мережі.

# 1 ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОДАНИХ У КОМП'ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ

## 1.1 Основна характеристика відеоданих

Зараз, коли сфера застосування персональних комп'ютерів дедалі розширюється, виникає ідея створити домашню відеостудію на базі комп'ютера. Однак, при роботі з цифровим відеосигналом виникає необхідність обробки та зберігання дуже великих об'ємів інформації, наприклад, одна хвилина цифрового відеосигналу з роздільною здатністю SIF (порівняний з VHS) і кольором true color (мільйони кольорів) займе  $(228 \times 358)$  пікселів \* 24 біта \* 25 кадрів/с \* = 442 Мб, тобто на носіях, що використовуються в сучасних ПК, таких, як компакт-диск (CD-ROM, близько 650 Мб) або жорсткий диск (кілька гігабайт) зберегти повноцінне за часом відео, записане, в такому форматі не вдасться. За допомогою MPEG – стиснення обсягу відеоінформації можна помітно без помітної деградації зображення.

MPEG – це аббревіатура Moving Picture Experts Group. Ця експертна група працює під спільним керівництвом двох організацій ISO (Організація з міжнародних стандартів) та IEC (Міжнародна електротехнічна комісія). Офіційна назва групи – ISO/IEC JTC1 SC 29 WG 11. Її завдання – розробка єдиних норм кодування аудіо та відео сигналів. Стандарти MPEG використовують у технологіях CD і CD-Video, є частиною стандарту DVD. Активно застосовуються у цифровому радіомовленні, у кабельному та супутниковому ТБ, Інтернет-радіо, мультимедійних комп'ютерних продуктах, у комунікаціях по каналах ISDN та багатьох інших електронних інформаційних системах. Часто аббревіатуру MPEG використовують посилення на стандарти, розроблені цією групою. На сьогоднішній день відомі такі:

MPEG-1 призначений для запису синхронізованих відеозображень (зазвичай у форматі SIF, 228\*358) та звукового супроводу на CD-ROM з урахуванням максимальної швидкості зчитування близько 1,5 Мбіт/с. При пропускній здатності системи передачі даних в межах від 3 до 15 Мбіт/с, професіонали використовують і великі потоки, в апаратурі використовуються потоки до 50 Мбіт/с. На технології, засновані на MPEG-2, переходять багато телеканалів, сигнал стислий відповідно до цього стандарту транслюється через телевізійні супутники, використовується для архівації великих об'ємів відеоматеріалу. ) зі швидкістю потоку даних 20 - 40 Мбіт / с, але пізніше став частиною стандарту MPEG-2 і окремо тепер не згадується. оптичних дисків і через мережу), графічних додатків та цифрового телебачення.

Базовим об'єктом кодування стандарту MPEG є кадр телевізійного зображення. Оскільки у більшості фрагментів фон зображення залишається досить стабільним, а дія відбувається лише на передньому плані, стиск починається зі створення вихідного кадру. Вихідні (Intra) кадри кодуються тільки із застосуванням внутрішньокадрового стиску за алгоритмами, аналогічними використуванню у JPEG. Кадр розбивається на блоки 8x8 пікселів. Над кожним блоком проводиться дискретно-косинусне перетворення (ДКП) з подальшим квантуванням отриманих коефіцієнтів. Внаслідок високої просторової кореляції яскравості між сусідніми пікселями зображення, ДКП призводить до концентрації сигналу та низькочастотної частини спектра, який після квантування ефективно стискується з використанням кодування кодами змінної довжини. Обробка передбачуваних (Predicted) кадрів проводиться з використанням передбачення вперед за попередніми або передбачуваними кадрами. Кадр розбивається на макроблоки 16\*16 пікселів, кожному макроблоку ставиться у відповідність найбільш схожу ділянку зображення з опорного кадру, зрушений на вектор переміщення. Ця процедура називається аналізом та компенсацією руху.

Допустимий ступінь стиснення для передбачуваних кадрів перевищує можливий для вихідних у 3 рази. Залежно від характеру відеозображення,

кадри двонаправленої інтерполяції (Bi-directional Interpolated) кодується одним із чотирьох способів: передбачення вперед, зворотне передбачення з компенсацією руху, внутрішньокадрове прогнозування зображення, двоспрямоване прогнозування при різкій зміні сюжету або при високій швидкості переміщення елементів зображення. З двонаправленими кадрами пов'язано найбільш глибоке стиснення відеоданих, але, оскільки висока ступінь стиснення знижує точність відновлення вихідного зображення, двонаправлені кадри не використовуються як опорні. Якби коефіцієнти ДКП передавалися точно, відновлене зображення повністю збігалось б з вихідним. Однак помилки відновлення коефіцієнтів ДКП, пов'язані з квантуванням, призводять до спотворень зображення. Чим грубіше проводиться квантування, тим менший обсяг займають коефіцієнти і тим сильніше стиснення сигналу, але і тим більше візуальних спотворень [1].

## 1.2 Технології передачі даних з мінімальною втратою даних

У середині 80-х років американський національний інститут стандартів (ANSI) та Міжнародний консультативний комітет з телефонії та телеграфії (CCITT, МККТТ) розпочинали розробку стандартів АТМ (Asynchronous Transfer Mode – Асинхронний Режим Передачі) як набору рекомендацій для мережі B-ISDN (B-ISDN Services Digital Network).

Тільки в 1991 р. зусилля академічної науки увінчалися створенням АТМ-Форуму, який досі визначає розвиток технології. Першим великим проектом, зробленим з її використанням у 1994 році, стала магістраль відомої мережі NSFNET (що до цього використовувала канал Т3).

Якщо говорити загалом, то суть АТМ дуже проста – потрібно змішати всі види трафіку (голос, відео, дані), ущільнити і передати по одному каналу зв'язку. Як зазначалося вище, досягається це шляхом будь-яких технічних проривів, а скоріш численними компромісами. У чомусь це схоже на спосіб розв'язання диференціальних рівнянь. Безперервні дані розбиваються на

інтервали, які досить малі і з якими можна проводити операції з комутації.

Звісно, такий підхід сильно ускладнив і так непросте завдання розробників і виробників реального устаткування, і неприпустимо для ринку затримав терміни впровадження.

Нижче показано принцип роботи АТМ (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Принцип роботи АТМ

На розмір мінімальної порції даних (осередків термінології АТМ) впливають кілька чинників. Збільшення розміру знижує вимоги на швидкість процесора комутатора осередків, і підвищує ефективність використання каналу. З іншого боку, що менше осередок, то ближче до реального часу можлива передача.

Справді, поки один осередок передається, другий (нехай першочерговий) чекає. Сильна математика, механізм черг та пріоритетів може трохи згладити ефект, але не усунути причину. Після досить довгих експериментів у 1989 році для осередку було визначено розмір 53 байти (5 байт службових, і 48 даних).

Очевидно, що для різної швидкості цей розмір може бути різним. Якщо

для швидкостей від 25 до 155 Мбіт/с підходить 53 байти, то для гігабіта 500 байт будуть нічим не гірше, а для 10 гігабіт годяться і 5000 байт. Але в цьому випадку проблема сумісності стає нерозв'язною.

Міркування носять аж ніяк не академічний характер – саме обмеження на швидкість комутації поставило технічну межу підвищенню швидкості АТМ більше 622 Мбіт, і різко підвищило вартість на менших швидкостях.

Другий компроміс АТМ – технологія із встановленням з'єднання. Перед сеансом передачі на каналному рівні встановлюється віртуальний канал відправник-одержувач, який не може використовуватись іншими станціями. Тоді як у традиційних технологіях статистичного ущільнення з'єднання не встановлюється, а в середу передачі розміщуються пакети із зазначеною адресою.

Для цього в таблицю комутації заносяться номер порту та ідентифікатор з'єднання, який присутній у заголовку кожної комірки. Згодом комутатор обробляє комірки, що надходять, ґрунтуючись на ідентифікаторах з'єднання в їх заголовках. Спираючись на цей механізм, можна регламентувати для кожного з'єднання пропускну здатність, затримку, максимальну втрату даних. Тобто, забезпечувати певну якість обслуговування.

Всі перелічені властивості плюс хороша сумісність з ієрархією SDH дозволила АТМ порівняно швидко встановитися як стандарт магістральних мереж передачі даних. Але з повною реалізацією всіх можливостей технології виникли величезні проблеми. Як це бувало неодноразово, локальні мережі та клієнтські програми не підтримували функцій АТМ. Без цього потужна технологія з великим потенціалом ставала лише зайвим перетворенням між світами ІР (по суті Ethernet) і SDH.

Склалася дуже неприємна ситуація, яку співтовариство АТМ спробувало виправити. На жаль, не обійшлося без стратегічних прорахунків. Насправді, незважаючи на всі переваги волоконної оптики порівняно з мідними кабелями, висока ціна інтерфейсних плат та портів комутаторів

робила АТМ на 155 Мбіт/с надзвичайно дорогим для використання у цьому сегменті ринку.

Зробивши спробу визначити низькошвидкісні рішення для настільних систем, АТМ Forum вплутався в руйнівні суперечки з приводу того, на яку швидкість і тип з'єднання слід орієнтуватися. Виробники розділилися на два табори прихильників мідного кабелю зі швидкістю 25,6 Мбіт/с та оптичного кабелю при швидкості 51,82 Мбіт/с.

Коли після низки гучних конфліктів (спочатку було обрано швидкість 51,82 Мбіт/с), АТМ Forum проголосив 25 Мбіт/с як стандарт. Але дорогоцінний час було втрачено безповоротно. На ринку технології довелося зустріти вже не "класичний" Ethernet з його середовищем передачі, що розділяється, а Fast Ethernet і комутований 10base-T (з надією на швидку появу комутованого 100base-T). Висока ціна, невелика кількість виробників, необхідність більш кваліфікованого обслуговування, проблеми з драйверами, і т.п. тільки посилили ситуацію [2].

### 1.3 Бездротові технології передачі даних

Бездротові технології – підклас інформаційних технологій, служать передачі інформації між двома і більше точками з відривом, не вимагаючи дротового зв'язку. Для передачі можуть використовуватися радіохвилі, і навіть інфрачервоне, оптичне чи лазерне випромінювання.

Існує безліч бездротових технологій, найчастіше відомих за маркетинговими назвами, такими як Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, Радіотелефон. Кожна технологія має певні характеристики, які визначаються її сферою застосування.

Існують різноманітні підходи до класифікації бездротових технологій.

За дальністю дії:

- бездротові персональні мережі (WPAN – Wireless Personal Area Networks). Приклади технологій – Bluetooth;

- бездротові локальні мережі (Wireless Local Area Networks). Приклади технологій – Wi-Fi;
- бездротові мережі масштабу міста (WMAN – Wireless Metropolitan Area Networks). Приклади технологій – WiMAX;
- бездротові глобальні мережі (WWAN – Wireless Wide Area Network). Приклади технологій – CSD, GPRS, EDGE, EV-DO, HSPA, UMTS, LTE, LTE Advanced.

За топологією:

- «точка-точка»;
- «точка-многоточка».

По галузі застосування:

- корпоративні (відомчі) бездротові мережі – створювані компаніями для потреб;
- операторські бездротові мережі – створені операторами зв'язку для надання послуг.

Коротким, але ємним способом класифікації може бути одночасне відображення двох найбільш суттєвих характеристик бездротових технологій на двох осях: максимальна швидкість передачі інформації та максимальна відстань [3].

Класифікація за дальністю дії наведена нижче (рисунок 1.2).

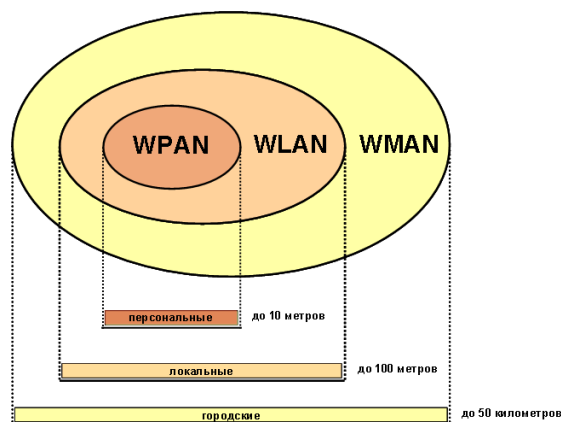


Рисунок 1.2 – Класифікація за дальністю дії

## 2 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

### 2.1 Застосування алгоритму бджолої колонії BeeAdHoc для маршрутизації у FANET

У 1989 році Херардо Бені та Ван Цзіном був введений термін «роевий інтелект» (PI) (англ. Swarm Intelligence, SI). Цей термін використовувався для системи клітинних роботів і мав на увазі колективну поведінку децентралізованої системи, що самоорганізується [4]. Надалі PI став загально визнаним методом оптимізації теорії штучного інтелекту. PI являє собою багатоагентну систему інтелектуальної оптимізації, що володіє поведінкою, що самоорганізується [5].

Ройові алгоритми (РА) ґрунтуються на моделюванні соціальної поведінки птахів чи риб у зграї чи комах у рої. Алгоритми знайшли своє застосування під час вирішення складних комплексних оптимізаційних завдань. Рішенням є знаходження мінімуму чи максимуму цільової функції з дискретної множини можливих рішень [6].

Слід зазначити, що роєві агенти керуються локальними правилами і мають глобального ставлення до мети. Взаємодія між агентами призводить до формування певного колективного розуму. Самоорганізація є ключовою особливістю системи, низькорівнева взаємодія призводить до змін на макроскопічному (глобальному) рівні [7].

В роботі розглянуті алгоритми на основі поведінки бджолиних колоній, реалізовані для вирішення задачі маршрутизації в бездротових мережах, що самоорганізуються MANET (Mobile Ad Hoc Network), VANET (Vehicular Ad Hoc Network). Проведено експериментальні дослідження з метою з'ясування можливості використання алгоритмів бджолої колонії у FANET (Flying Ad Hoc Network)[8].

### 2.1.1 Бджолині алгоритми

Одним із напрямків досліджень у галузі біоінспірованих методів є алгоритми бджолоїної колонії, запропоновані на початку 2000-х років [9].

Основою алгоритмів є математичне моделювання поведінки бджіл у пошуках нектару.

Двухрівнева стратегія пошуку містить у собі основну ідею роботи алгоритму. За рахунок використання бджіл-розвідників формується випадкова безліч перспективних позицій (джерел нектару). При поверненні у вулик бджоли виконують «віляючий танець» (що є, по суті, специфічною формою комунікації між бджолами), в якому передається закодована інформація про відстань до знайденого джерела їжі, про напрямлення до цього джерела, про якість та кількість знайденого там нектару (рисунок 2.1).

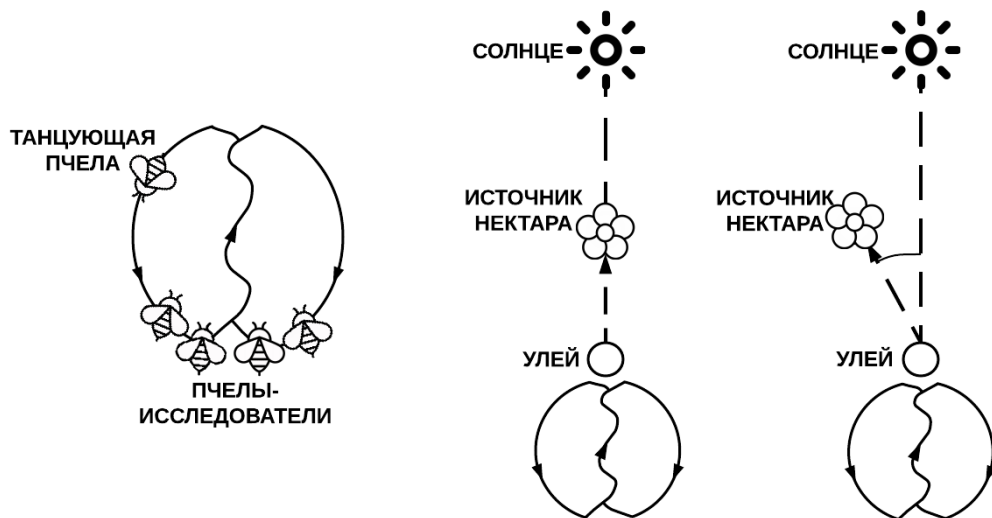


Рисунок 2.1 – Схема «віляючого» танцю

З другого краю рівні з допомогою бджіл-фуражиров здійснюється дослідження околиць [10].

Метою бджолоїної колонії є пошук джерела, що містить максимальну кількість нектару, що відповідає цільовій функції (ЦФ) оптимізаційної задачі. При цьому рішення подається у вигляді точки (позиції) у просторі пошуку

(рисунок 2.1) [11]. Дана парадигма лежить в основі наступних алгоритмів: Bee colony optimization [12], Bees Algorithm [13], Virtual Bee Algorithm [14], Artificial Bee Colony [15], Bee Hive algorithm [16]. Більш детальний опис принципу дії та областей застосування бджолиного алгоритму представлено у роботах [17, 18].

### 2.1.2 Самоорганізовані мережі БПЛА

Останнім часом великої популярності набувають мережі FANET. Ці мережі являють собою різновид одноранговій мережі VANET, що самоорганізується, основними вузлами якої є безпілотні літальні апарати (БПЛА). Застосування БПЛА як фундамент для організації мережевої інфраструктури є привабливим підходом з погляду збільшення телекомунікаційних можливостей мережі. Мережа на основі БПЛА характеризується багатофункціональністю, гнучкістю та порівняно невеликими експлуатаційними витратами [19]. Таку мережу можна застосувати у різних галузях народного господарства (рисунок 2.2).

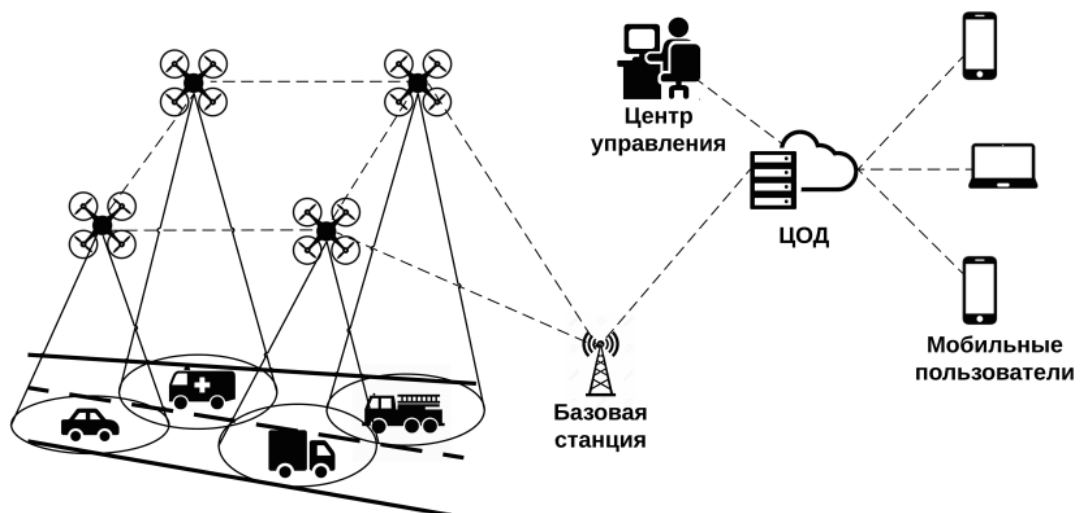


Рисунок 2.2 – Приклад використання мережі FANET для моніторингу дорожнього руху

### 2.1.3 Алгоритми та методи маршрутизації у FANET

Технології організації самоорганізованих мереж FANET нині перебувають у стадії розробки, з'являються нові й алгоритми маршрутизації, удосконалюються старі [20-22].

Вибір протоколу маршрутизації визначається вимогами, що висуваються: кількістю вузлів, їх мобільністю, підтримкою QoS, типів переданого трафіку і т.д.

Основою для будь-якого протоколу маршрутизації є алгоритм, який застосовується для пошуку найкращого шляху (як правило, найкоротшого) між вузлом-джерелом та вузлом-одержувачем.

При цьому методи маршрутизації повинні задовольняти такі вимоги [23, 24]:

- враховувати особливості FANET;
- забезпечувати швидку збіжність (побудову маршруту) та відсутність зациклювання маршрутів;
- забезпечувати надійну доставку пакетів;
- підтримувати кілька маршрутів доставки інформації до вузла призначення;
- забезпечувати мінімальне завантаження мережі службовою інформацією;
- мати механізми виявлення недоступних маршрутів та їх видалення/відновлення;
- забезпечувати побудову маршрутів відповідно до вимог, що висуваються.
- (QoS, джиттер та ін.);
- мати механізми забезпечення безпеки процесів маршрутизації та передачі даних;
- забезпечувати мінімізацію енергоспоживання вузлів мережі та ін.

#### 2.1.4 Маршрутизація в мережі, що самоорганізується, на основі алгоритмів бджолоїної колонії

Бджолині алгоритми, розроблені для телекомунікаційних мереж, від більшості традиційних алгоритмів.

Дослідники виявили ряд особливостей, які знайшли своє успішне застосування при вирішенні проблем маршрутизації в бездротових мережах, що самоорганізуються [25, 26]:

- бджоли організують ефективну і високоорганізовану систему;
- демонструють адаптивність умовами навколишнього середовища, що змінюються;
- мають відмовостійкість, здатні швидко відновлювати свою чисельність після втрати особин;
- є високе зростання чисельності популяції (масштабованість).

Розглянемо процес маршрутизації в мережі, що самоорганізується, на основі бджолоїного алгоритму BeeAdHoc (рисунок 2.3) [27].

Перший етап – «розвідка» – складається з прямої та зворотної розвідок. Прямі розвідники здійснюють у мережі пошук вузла призначення. При виявленні вузла призначення зворотний розвідник повертається у вузол-джерело. Розвідник містить таку інформацію: ID розвідника, ID вузла-джерела, мінімальну залишкову енергію (спочатку дорівнює нескінченності) та кількість хопів (спочатку дорівнює нулю). Розвідники прямують до всіх сусідів вузла-джерела. Кожен проміжний вузол збільшує лічильник числа стрибків на одиницю. Від значення цього лічильника залежить енергетична ефективність даних, що передаються. При виявленні вузла призначення зворотний розвідник повертається у вузол-джерело. На проміжних вузлах алгоритм стежить за змінами характеристик розвідників та, керуючись отриманою інформацією, приймає рішення щодо ефективності маршруту.

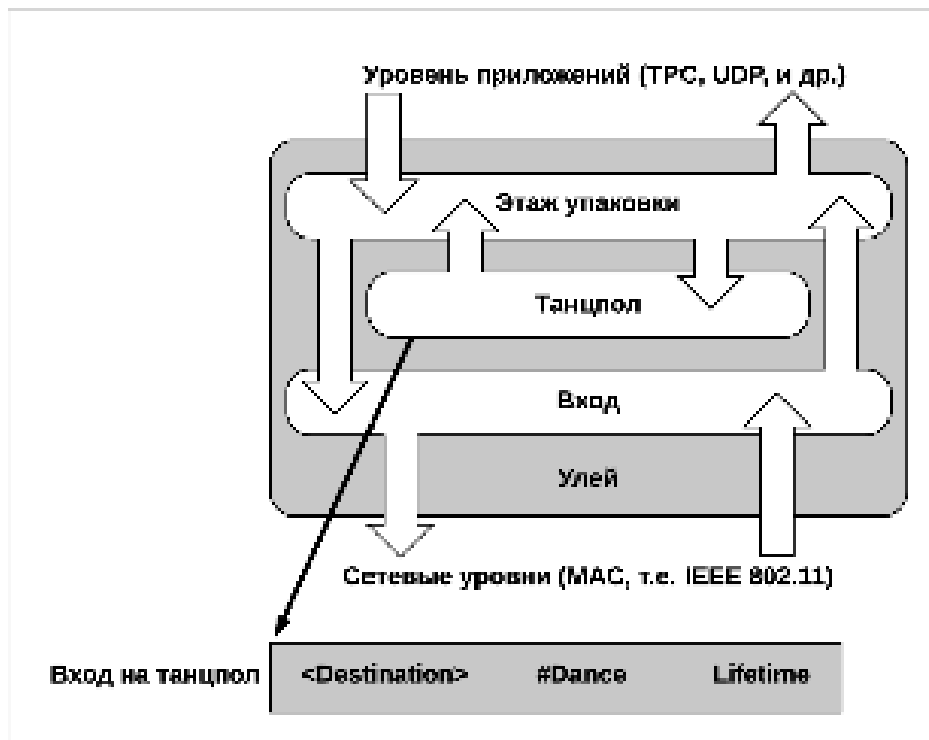


Рисунок 2.3 – Архітектура протоколу BeeAdHoc

Таким чином, встановлюються численні канали між джерелом і вузлом призначення.

Після завершення розвідки та встановлення маршруту за допомогою формули танцю визначається необхідна кількість робочих бджіл. Після цього настає етап «збирання ресурсів». Бджоли передають дані за аналогією з діями кашкетів у живій природі, що доставляють нектар у вулик.

Дані передаються від джерела до вузла призначення. Кількість бджіл-фуражиров може змінюватись в залежності від зміни ситуації в мережі. На відміну від мурашиних алгоритмів, проміжні вузли не приймають жодних рішень щодо маршрутизації, всі рішення ініціюються вузлом-джерелом [28].

Щоб повернутися назад, фуражири повинні об'єднатися в один «рой». Об'єднання відбувається відповідно до ID-маршрутів робочих бджіл. Під час повернення визначається якість маршрутів, причому енергетично неефективні видаляються з таблиць маршрутизації.

### 2.1.5 Сценарій проведення імітаційного моделювання

Порівняння протоколів маршрутизації в мережах FANET, що самоорганізуються, утруднено внаслідок впливу великої кількості факторів, що володіють випадковим характером і з цієї причини слабо піддаються строгому математичному аналізу.

Для дослідження роботи Ad Hoc мережі використовуються засоби імітаційного моделювання. Поява програмного забезпечення для імітаційного моделювання дозволила проводити необхідні дослідження та експерименти, у тому числі вдосконалити існуючі та розробити нові протоколи маршрутизації без реального розгортання мережі.

Для проведення імітаційного моделювання на вибір пропонується широкий спектр програмних засобів. Найбільш відомими та популярними є такі засоби імітаційного моделювання: ns-2, ns-3, OPNET/Riverbed SteelCentral, OMNET++, QualNet/GloMoSiM та ін.

У цій роботі дослідження протоколу маршрутизації BeeAdHoc проводилися в мережевому симуляторі ns-2 з встановленим протоколом BeeAdHoc. Порівняння проводилося з протоколами, реалізованими у симуляторі: AODV, DSDV, DSR.

У мережі, що моделюється, визначені такі постановочні умови та обмеження:

- операційна система – Ubuntu 14.04.5 Desktop (64-bit) LTS;
- версія мережевого симулятора – ns-2.34;
- візуалізація переміщення БПЛА за допомогою утиліти NetAnim;
- дослідження протоколів маршрутизації проводилося для угруповань, що складаються з 10, 20, 30, 40, 50 БПЛА.

Параметри, що використовуються для проведення імітаційного моделювання, були вибрані на основі аналізу різних публікацій (див. напр. [29-32]). У результаті було зроблено висновок у тому, що це

дослідники використовують приблизно однакові параметри (див. таблиця 2.1), які варіюються залежно від цілей проведеного дослідження.

Сценарій імітаційного експерименту складається з вузлів, що імітують поведінку БПЛА, що переміщуються випадковим чином відповідно до моделі мобільності на основі випадкових маршрутних точок (англ. Random Waypoint, RWP), в області розміром 1500x1500 м<sup>2</sup> (рисунок 2.4) [33, 34]. На рівні додатків як джерело корисного трафіку використовується генератор з фіксованим темпом видачі пакетів (Constant Bit Rate, CBR). Моделювання роботи передачі трафіку на транспортному рівні здійснюється за допомогою UDP-дейтаграм зі швидкістю 512 Кбіт/с.

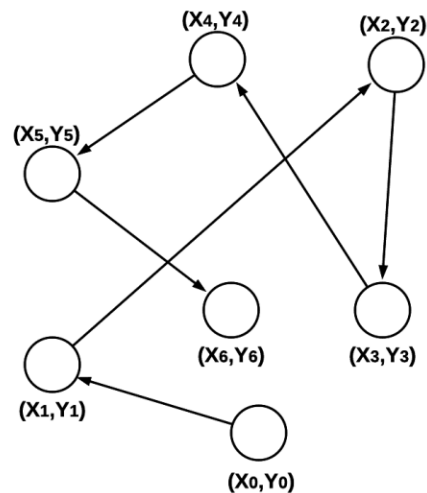


Рисунок 2.4 – Модель мобільності на основі випадкових маршрутних точок

Крім сценаріїв, у яких змінювалися кількість вузлів мережі та швидкість пересування, інші умови були однаковими.

Для оцінки продуктивності протоколів маршрутизації використовуються такі метрики [35, 36]:

Наскрізна затримка (End-to-End delay): затримка між першим переданим байтом та останнім отриманим байтом. Вона включає затримку передачі, затримки черги процесу і затримку поширення [37].

Пропускна спроможність (Throughput): характеризує максимально можливу швидкість успішної доставки пакетів каналом зв'язку [38].

Накладні витрати на маршрутизацію (Routing Overhead): накладні витрати на пошук маршрутів та побудова таблиці маршрутизації [39].

Вибір метрик обумовлений проведеним вивченням підходів, представлених у наукових працях, які здобули широке визнання серед наукової громадськості (див., напр., [40]).

Таблиця 2.1 – Параметри імітаційного моделювання

Параметр	Значення
Розмір області моделювання	1500 m x 1500 m
Тривалість ітерації	Random waypoint
Генератор трафіку MAC-рівень	10, 20, 30, 40, 50
Модель розповсюдження сигналу	20 sec
Тип антени	20, 40, 60, 80, 100 м/с
Зона покриття антени	CBR
Транспортний рівень	802.11 у режимі Ad Hoc
Розмір пакета	Omni
Швидкість вузлів	250 m
Модель мобільності	UDP
Кількість БПЛА	512 Kbytes
Швидкість вузлів	Friis

### 2.1.6 Імітаційне моделювання

Було припущено, що зі збільшенням кількості вузлів протокол BeeAdHoc демонструватиме найкращі показники продуктивності порівняно з протоколами AODV, DSDV та DSR. Очікувалося, що накладні витрати маршрутизації та наскрізна затримка збільшуватимуться, а пропускна спроможність залишиться без істотних змін.

Під час проведення експерименту кількість вузлів мережі варіювалася в діапазоні значень від 10 до 50.

На рисунку 2.5 видно, що зі збільшенням кількості вузлів збільшується пропускна спроможність протоколів BeeAdHoc, DSR, AODV, при цьому DSDV має найгірші показники – його пропускна здатність знижується пропорційно до збільшення кількості вузлів.

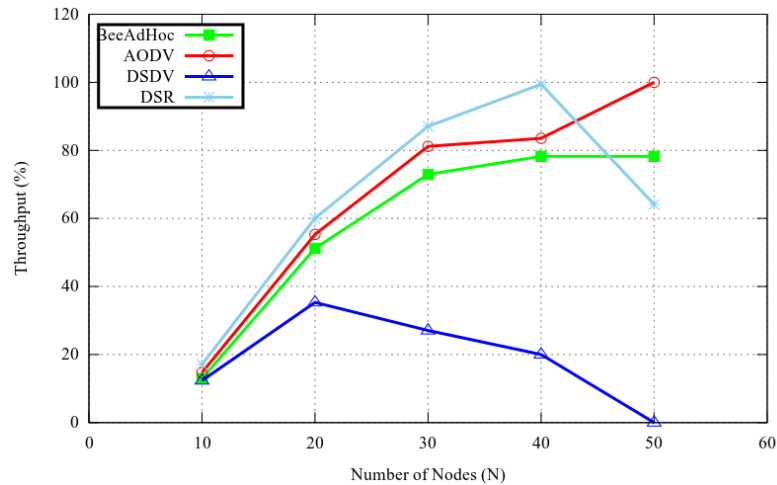


Рисунок 2.5 – Відношення пропускної спроможності до кількості вузлів

З рисунку 2.6 видно, що зі зростанням числа вузлів відбувається збільшення накладних витрат на маршрутизацію для всіх протоколів, що розглядаються. При цьому DSR та DSDV демонструють кращі показники, а BeeAdHoc у середньому перевершує AODV.

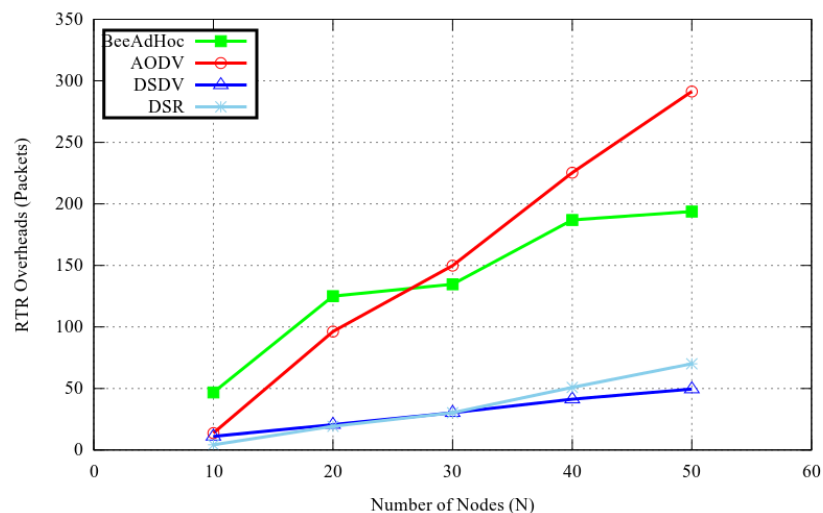


Рисунок 2.6 – Співвідношення службового трафіку та кількості вузлів

На рисунку 2.7 показано поведінку алгоритмів співвідношення наскрізної затримки до кількості вузлів. BeeAdHoc трохи поступається протоколам AODV і DSR. DSDV має кращі показники, т.к. є проактивним/табличним протоколом і його таблиці маршрутизації зберігаються маршрути всім вузлам.

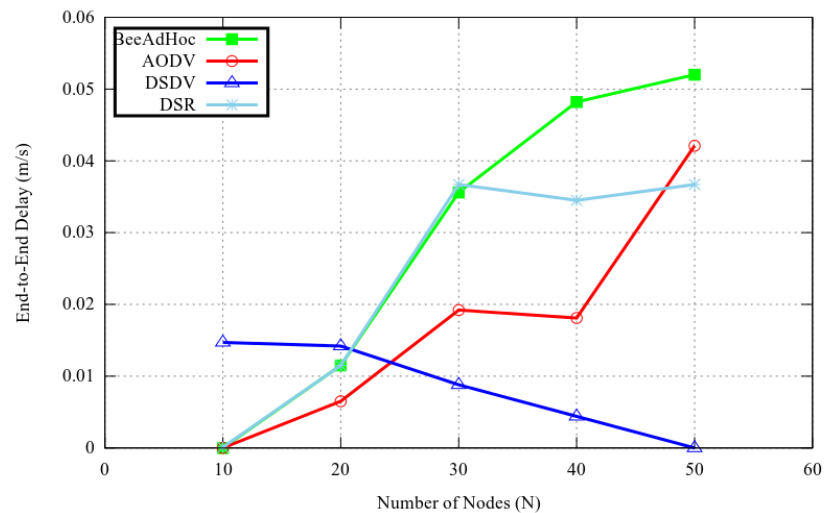


Рисунок 2.7 – Співвідношення наскрізної затримки та кількості вузлів

Далі представлені графіки, що демонструють адаптивність алгоритмів до змін топології та мобільності вузлів.

Алгоритми демонструють різну поведінку щодо цього, DSDV відзначається нестабільною поведінкою. BeeAdHoc є найбільш адаптивним алгоритмом по відношенню до змін топології, в цілому зміна швидкості незначно впливає на його пропускну здатність. Зі збільшенням швидкості алгоритми BeeAdHoc та AODV швидко адаптуються до змін та мають кращі показники щодо пропускну здатності.

З рисунка 2.8 видно, що DSDV і DSR не мають великого навантаження щодо накладних витрат на маршрутизацію зі збільшенням мобільності вузлів, як показано на рисунку 2.9. В той же час BeeAdHoc зазнає підвищеного навантаження. AODV має прямо протилежну поведінку порівняно з BeeAdHoc завдяки тому, що AODV використовує таблицю маршрутизації

для зберігання кількох шляхів до місця призначення, та альтернативні шляхи можуть бути знайдені без необхідності запуску процесу виявлення маршруту.

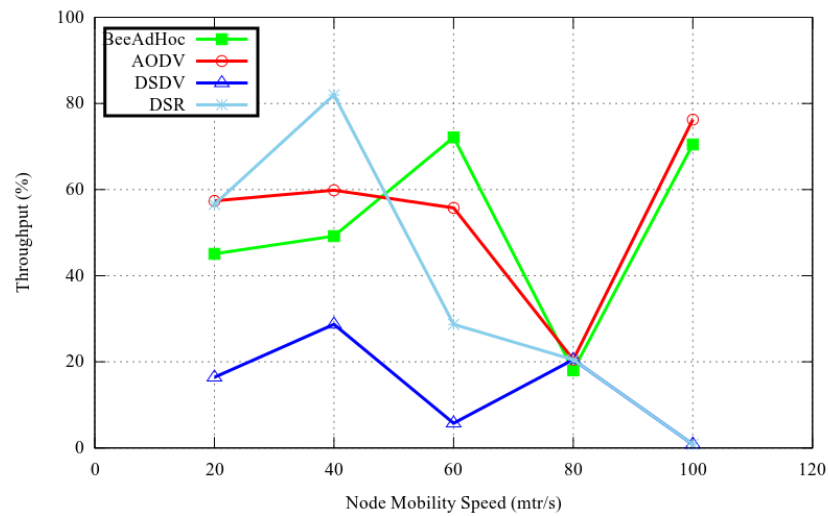


Рисунок 2.8 – Відношення пропускної спроможності до швидкості руху вузлів

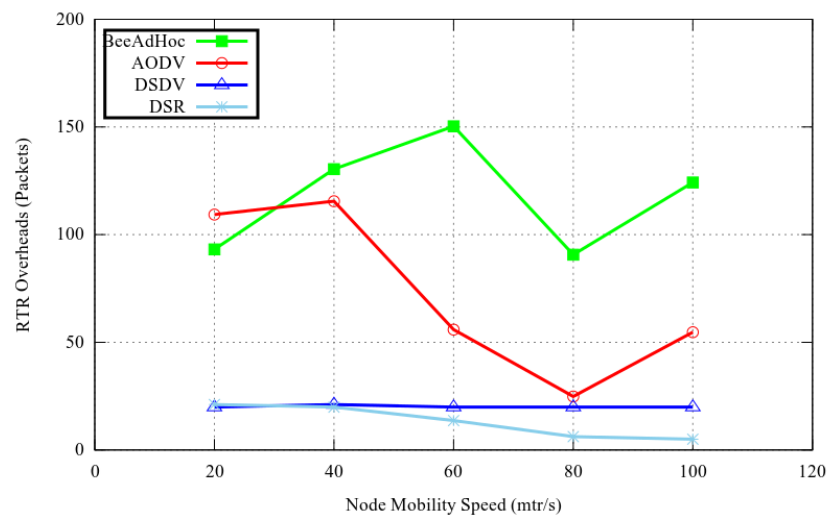


Рисунок 2.9 – Відношення службового трафіку до швидкості руху вузлів

BeeAdHoc має великі витрати порівняно з протоколами (рисунки 2.10) у зв'язку з необхідністю пошуку нового маршруту до вузла призначення, що, у свою чергу, дає перевагу над іншими протоколами пропускної спроможності.

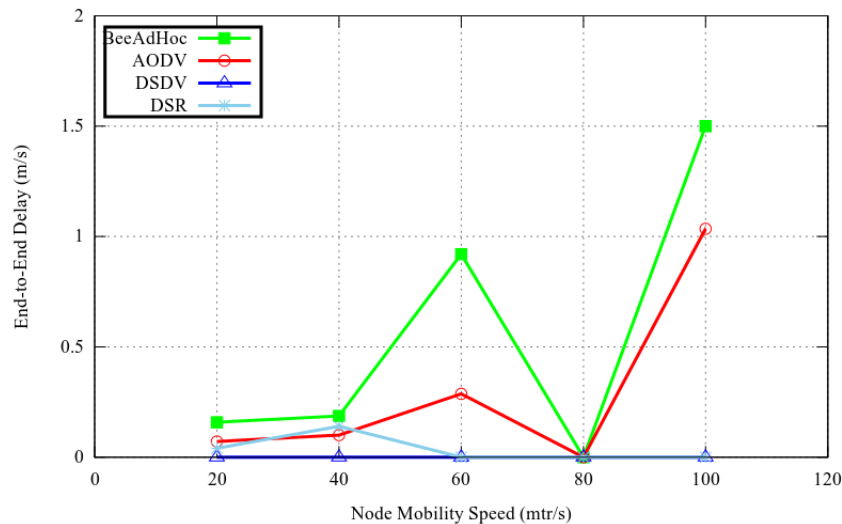


Рисунок 2.10 – Відношення наскрізної затримки до швидкості руху вузлів

На основі результатів, отриманих в ході експериментального дослідження, можна зробити наступний висновок: алгоритм BeeAdHoc забезпечує більш високу пропускну здатність порівняно з DSDV та DSR, але поступається їм затримкою. У середньому продуктивність BeeAdHoc порівнянна з протоколами DSR, DSDV і AODV, що розглядаються. BeeAdHoc можна використовувати для маршрутизації пакетів у мережі FANET.

На сьогоднішній день не існує алгоритму маршрутизації, що задовольняє всі вимоги, що пред'являються до FANET, і забезпечує високі показники ефективності роботи мережі в різних умовах.

На прикладі протоколу BeeAdHoc було проведено експериментальний аналіз, результати якого підтверджують доцільність застосування алгоритмів бджолої колонії для маршрутизації до FANET порівняно з іншими алгоритмами.

Напрямок для подальших досліджень є вивчення поведінки алгоритму BeeAdHoc під час його використання у різних сценаріях. При проведенні експериментальних досліджень планується емулювати не тільки різні типи трафіку (голос/відео), але й змінювати розмір пакетів даних, що пересилаються.

Крім того, доцільним є проведення досліджень, пов'язаних з розробкою уніфікованої методики тестування протоколів маршрутизації у FANET.

## 2.2 Аналіз сучасних стандартів стиску відеоданих

Поширення технологій цифрового мовлення та цифрового відео призвело до необхідності розробки ефективних методів стиснення послідовності відео. Стиснення відео засноване на двох важливих принципах: просторової надмірності, властивій кожному кадру відеоряду, та тимчасової надмірності, тобто. подібності одного кадру до наступного [41, 42]. Таким чином, типовий метод стиснення полягає в кодуванні першого кадру за допомогою деякого алгоритму стиснення зображень та наступного кодування різниці першого кадру та наступних. Якщо черговий кадр сильно відрізняється від першого кадру послідовності, його кодують повністю, і він стає першим кадром нової послідовності. Для підвищення ефективності усунення тимчасової надмірності використовується компенсація руху [42].

Розглянемо етапи процедури стиснення даних у загальному вигляді. Будь-який метод стиснення реалізує три основні етапи:

- етап попередньої обробки (фільтрація шумів);
- основне перетворення;
- кодування та упаковка компонентів перетворення [43].

З другого краю етапі виконується перетворення вихідних даних із однієї форми подання на іншу. Зокрема, при стисканні зображень залежно від виду алгоритму стиснення може бути виконаний перехід від вихідного зображення до наступних видів подання:

- матриці компонент спектра (при спектральному перетворенні);
- набору коефіцієнтів перетворення (при фрактальному стисканні);
- опис об'єктів зображення (при стисненні з розпізнаванням).

### 2.2.1 Перелік стандартів стиснення відеоданих

Для різних сфер використання цифрового відео висувалися різні вимоги до стиснення, які призвели до формування ряду стандартів стиснення для різних сфер застосування:

- для ISDN-відеоконференцій розроблено стандарт стиснення ITU H.261;

- для відеоконференцій у телефонних мережах – стандарт H.262 та стандарт H.263 для відеоконференцій у мережах АТМ та широкосмуговими каналами;

- необхідність стиснення відеопослідовностей для зберігання на CD-ROM (з умовою забезпечення 1.2 Мбіт/с для відео-потoku та 256 кбіт/с для аудіо) призвела до створення початкового стандарту ISO MPEG-1;

- для мовлення та зберігання на DVD, з бітрейтом від 2 до 15 Мбіт/с для відео та аудіо, було розроблено стандарт ISO MPEG-2;

- необхідність кодування окремих аудіо-візуальних об'єктів як природного походження, так і синтезованих, призвела до створення ISO MPEG-4 (цей стандарт включає кілька частин, в яких розглядається, крім кодування відео, аудіокодування, кодування об'єктів і т.д., причому до відео відносяться частина 2-ISO 14496-2 або MPEG-4 Part 2, і частина 10 - ISO 14496-10 або MPEG-4 Part 10);

- необхідність кодування метаданих, що описують властивості мультимедійних даних, що призвела до появи MPEG-7.

У AVC/H.264 визначено такі профілі: базовий (baseline), основний (main), розширений (extended). Пізніше розширений профіль був доповнений профілем для відео високої роздільної здатності (high profile), профілем high 10, профілем high 4:2:2 та профілем high 4:4:4.

Базовий профіль націлений на кодування та декодування в реальному часі для мобільних пристроїв. Він підтримує прогресивну розгортку,

використовує I- та P-кадри, а також ентропійне кодування за методом CAVLC.

Основний профіль призначений в основному для використання у ширококомовленні. Він підтримує нарядкову та прогресивну розгортки, використовує I-, P-, B-кадри, вагове передбачення (weighted prediction), а також ентропійне кодування за методами CAVLC та CABAC.

Розширений профіль призначений для використання в засобах передачі, схильних до помилок – наприклад, у мобільних комунікаціях. Використовує I-, P-, B-, SP-, SI-кадри, що підтримує як черезрядкову, так і прогресивну розгортку, дозволяє використовувати тільки метод CAVLC для ентропійного кодування.

Профіль для відео високої роздільної здатності призначений для ефективного кодування HDV (high definition video). Він використовує адаптивний розмір блоку ( $8 \times 8$  або  $4 \times 4$ ) та дозволяє застосовувати контекстно-залежні матриці квантування.

Профіль high 10 є розширенням попереднього профілю для 10 біт на відлік компоненти зображення. Профіль high 4:2:2 підтримує формат YUV 4:2:2 і до 10 біт на відлік для кольорових компонентів зображення; а профіль high 4:4:4 підтримує формат YUV 4:4:4 і до 12 біт на відлік компонентів зображення. Крім цього, він дозволяє використовувати режим кодування без втрат і пряме кодування RGB сигналу. Цей профіль призначений для кодування відео студійної якості.

Кодування здійснюється побічно. При цьому спочатку проводиться передбачення відліків яскравості та кольоророзносних компонентів у просторовій та часовій областях. Потім різниця між передбаченими значеннями та реальними піддається цілочисленному перетворенню і квантується. Після цього результат стискається ентропійним кодером. Обробка кожного кадру ведеться в просторі YUV по блоках розміром  $16 \times 16$  для яркостної компоненти (luma) і по  $8 \times 8$  (для YUV 4:2:2) для кольорових компонент (chroma).

Цілочисельне перетворення здійснюється над блоками розміром  $4 \times 4$ . Це перетворення має схожі властивості з дискретним косинусним перетворенням, але відрізняється тим, що в ньому використовується ціла арифметика. Це дозволяє досягти підвищення швидкості роботи кодера та декодера. Отримані коефіцієнти за допомогою зигзаг-сканування вибудовуються у вектор, який квантується та піддається ентропійному стиску. Крім цього перетворення, у стандарті закладена можливість використання wavelet-перетворень.

AVC/H.264 визначає два інструменти для ентропійного кодування бітового потоку – контекстне адаптивне кодування зі змінною довжиною (Context-Adaptive Variable Length Coding, CAVLC) та контекстне адаптивне бінарне арифметичне кодування (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC) [43]. У CAVLC кількість коефіцієнтів, не рівних 0, кодується окремо від їх значення та положення у векторі. Після зигзаг-сканування коефіцієнтів перетворення великі значення коефіцієнтів, що відповідають низькочастотній складовій, розташовуються на початку вектора, а менші (відповідні високочастотній частині) – наприкінці. [48] робота методу CAVLC розглянута на наступному типовому векторі коефіцієнтів:

7 6-2 0-1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0

Для передачі інформації про цей вектор використовують такі дані:

а) кількість ненульових коефіцієнтів (N) та кількість коефіцієнтів, рівних одиниці за абсолютною величиною, що розташовуються після останнього ненульового елемента (T1). Для цього прикладу  $T1 = 2$  (коефіцієнти -1 і 1), а  $N = 5$  (коефіцієнти 7, 6, -2, -1, 1);

б) закодовані значення коефіцієнтів. При цьому для ненульових елементів, рівних по абсолютній величині одиниці, необхідно зберігати лише їхній знак. Коефіцієнти кодуються у порядку, тобто. першим закодованим коефіцієнтом у даному випадку буде -2. Для кодування використовуються 6 таблиць VLC (Variable Length Codes, коди змінної довжини) Голомбу. Для кодування першого коефіцієнта використовується стартова таблиця.

Контекстна адаптивність алгоритму полягає у можливості змінити таблицю для кодування кожного наступного коефіцієнта залежно від попередніх коефіцієнтів;

в) інформація про знаки. Для кодування символу використовується один біт. Для кодування одиничних коефіцієнтів, крім цього біта, жодної іншої інформації не потрібно, а для інших коефіцієнтів знаковий біт включається до кодів Голомба. Місцезнаходження кожного ненульового коефіцієнта кодується шляхом вказівки позицій нулів перед останнім ненульовим коефіцієнтом. Ця інформація розбивається на 2 частини:

1) загальна кількість нулів. Це число визначає кількість нулів між останнім ненульовим коефіцієнтом вектора та його початковим елементом. Для цього прикладу це число дорівнює 3. Оскільки вже відомо, що число ненульових коефіцієнтів у векторі ( $N$ ) дорівнює 5, то це число має бути в межах  $[0,11]$ . Для  $N$  в межах від 1 до 15 доступно 15 таблиць.  $N$ , що дорівнює 16, означає, що у векторі немає нульових коефіцієнтів;

2) розташування нулів у векторі. У цьому прикладі необхідно позначити положення 3 нулів. Спочатку кодується кількість нулів перед останнім ненульовим коефіцієнтом (у прикладі – 2). Це число повинно бути в межах  $[0,3]$ , тому використовується відповідна таблиця VLC. Залишилося закодувати становище останнього нуля. Кількість нулів перед передостаннім ненульовим коефіцієнтом має бути не більше  $[0,1]$ . У прикладі це число дорівнює 1. Більше нулів немає, тому кодування закінчується.

Ефективність ентропійного кодування може бути підвищена за допомогою контекстно-адаптивного двійкового арифметичного кодування (САВАС). Використання арифметичного кодування допускає використання нецілої кількості біт на символ алфавіту, що особливо добре для символів із ймовірністю більше 0,5. Важливою особливістю САВАС є контекстне моделювання. Статистичні дані про вже закодовані символи використовуються для оцінки ймовірностей символів. Ці дані використовуються для перемикання кількох моделей для оцінки ймовірності.

У H.264/AVC арифметичний кодер є сукупністю процедур низької складності, у яких відсутні операції множення. Процедури включають зрушення і звернення до таблиць. Використання CABAC дозволяє зменшити в середньому бітрейт на 10-15%. Найбільший вигрaш виходить зазвичай під час обробки нарядкових сигналів ТВ. У таблиці наводиться порівняння згаданих вище стандартів стиснення та алгоритмів стиснення, що використовуються в них.

MPEG-4, будучи останнім за часом появи стандартом, використовує найефективніші алгоритми стиснення даних, наприклад, алгоритм арифметичного кодування для ентропійного кодування та вейвлет-перетворення як первинний алгоритм. Найбільш перспективними зараз видаються такі напрямки розвитку:

- використання альтернативних методів стиснення без втрат, таких як різні реалізації арифметичного кодування (напр., CABAC), ланцюгові коди тощо;

- використання альтернативних перетворень – вейвлет-перетворень (DWT), фрактальних перетворень та виділення об'єктів з їх подальшим описом [9].

## 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА ВУЗЛАХ ВИСОКОМОБІЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

### 3.1 Від одиночних БПЛА до груп та комплексів

Залежно від типу керування безпілотні літальні апарати поділяють на некеровані (наприклад, метеорологічні зонди), дистанційно-пілотовані та автономні. Довгий час основну частину БПЛА складали дистанційно-пілотовані апарати. Сьогодні на зміну дистанційно-пілотованим апаратам приходять автономні апарати, здатні самостійно виконувати поставлене завдання за мінімального втручання людини-оператора.

Незважаючи на те, що широко відомі моделі БПЛА за розмірами співмірні з пілотованими літальними апаратами, 95 % усіх БПЛА становлять саме мікро та мініБПЛА, що свідчить про велику затребуваність малорозмірних БПЛА.

Одним із основних факторів, які виступають на користь малогабаритних БПЛА, є ціна їх виробництва. Незважаючи на те, що виробництво одиничних дослідних зразків міні та мікроБПЛА не можна вважати дешевим, проте розрахунки вартості серійних зразків у разі їх масового виробництва обнадіюють. Для порівняння, вартість одного повнорозмірного апарату становить близько 10 млн доларів США, тоді як вартість мініБПЛА лежить у межах 20-30 тисяч доларів, а розрахункова вартість мікроБПЛА за їх масового виробництва оцінюється в 10 доларів за одиницю [51].

Масове виробництво малорозмірних БПЛА призведе не лише до здешевлення одиничного зразка, а й до можливості їхнього групового застосування. У [51] запропоновано виділяти кілька етапів створення та застосування БПЛА. Створення та розробка окремих БПЛА представляється лише першим етапом. На другому етапі створюються комплекси з кількох

незалежних БПЛА. Третій етап передбачає створення комплексів, що взаємодіють один з одним БПЛА, а четвертий етап – створення комплексів з БПЛА, здатних вбудовуватися в будь-які складні функціонуючі системи, такі як сетецентричні системи управління, що дозволяє говорити про «БПЛА-технології».

Використання груп та комплексів малорозмірних БПЛА дозволить суттєво розширити сферу їх застосування. Низка проблем, які стоять зараз на шляху застосування малорозмірних БПЛА, відпадає при груповому застосуванні. Особливості та переваги застосування груп БПЛА докладно описані у [52].

### 3.2 Метод роєвої взаємодії

Однією із серйозних проблем, які стоять на шляху використання малорозмірних БПЛА, є складнощі у забезпеченні радіозв'язку з операторським пультом керування. Справа в тому, що малі розміри накладають суттєві обмеження на запас бортового енергоресурсу, більшу частину якого призначено для забезпечення руху, і лише невелика частина енергоресурсу може використовуватись прийнятною апаратурою. Таким чином, потужність радіопередавачів дуже обмежена. Невеликі розміри БПЛА також обмежують розміри антен.

Одним із рішень цієї проблеми є використання націлених наземних антен для супроводу апарату по лінії візування [53], очевидно, що такий підхід суттєво обмежує сферу застосування малорозмірних БПЛА.

Використання груп БПЛА робить питання забезпечення зв'язку ще більш актуальним. При централізованих стратегіях управління кожному БПЛА потрібен канал зв'язку з пропускною здатністю в кілька Мбіт/с для передачі зображень та іншої інформації про довкілля. Частковим розв'язанням проблеми може бути використання централізованих ієрархічних стратегій управління, у яких зв'язок із центральним пристроєм

управління є лише в деяких БПЛА, кожен із яких передає команди апаратам своєї підгрупи, причому дистанції між апаратами підгрупи щодо невеликі, отже, і енерговитрати таку передачу не такі істотні. Проте необхідність постійного зв'язку БПЛА верхнього рівня ієрархії з центральним пристроєм управління залишається проблемою.

Як розв'язання проблеми інформаційного обміну у групах БПЛА пропонується використовувати методи роєвого інтелекту.

Ройовий інтелект – це дисципліна, яка вивчає природні та штучні системи, що складаються з великої кількості окремих об'єктів (особей, агентів тощо), які здійснюють децентралізоване управління на основі принципів самоорганізації. Зокрема, ця дисципліна зосереджена на колективній поведінці в результаті локальних взаємодій окремих об'єктів між собою та з навколишнім середовищем [54]. Ройовий інтелект описує колективну поведінку децентралізованої системи, що самоорганізується, природного або штучного походження.

У групі БПЛА, що взаємодіє на основі роєвого інтелекту, кожен апарат здійснює взаємодію лише з деякими, найближчими до нього на даний момент апаратами. При цьому дальність зв'язку та енерговитрати на інформаційну передачу відносно невелика. БПЛА приймає рішення про поточну поведінку, спираючись на самостійно зібрані дані про навколишнє середовище, а також на дані, які передають сусідні апарати. Енерговитратний зв'язок з центральним пристроєм управління здійснюється лише зрідка, і, можливо, не всіма апаратами групи, лише для того, щоб отримати інформацію про завдання, що стоять перед групою, і для того, щоб передати звітну інформацію про стан групи та хід виконання поставленого раніше завдання.

Методи роєвої взаємодії знаходять застосування у завданнях управління великими групами наземних мобільних мікророботів (наприклад, проекти Swarm-bots і Swarmonoid), що може бути підтвердженням того, що застосування цих методів для груп БПЛА може виявитися настільки ж ефективним. Адже БПЛА можна розглядати як «повітряні роботи з шістьма

ступенями свободи» [53]. Це дозволяє припустити, що методи, апробовані на групах мікророботів, після невеликої адаптації зможуть знайти додаток у завданнях управління БПЛА.

Використання роєвих методів взаємодії у групах БПЛА допомагає вирішити ще одну проблему малорозмірних БПЛА – збирання даних про довкілля. Справа в тому, що малі габарити апарату суттєво обмежують доступний набір бортових сенсорних пристроїв. Обмежений енергоресурс також несприятливо позначається на допустимі енерговитрати засобів збору даних про довкілля, що призводить до зменшення радіусу роботи активних засобів збору даних, таких як лазерні далекоміри, ультразвукові датчики і т.п. Ці обмеження призводять до того, що малорозмірний БПЛА здатний самостійно зібрати інформацію лише щодо відносно невеликої області простору навколо себе. Тим не менш, для забезпечення стійкого польоту апарату необхідні дані нерухомих і рухомих перешкод, що розташовані у значно більшій зоні, особливо за курсом руху. При роєвій взаємодії в групі БПЛА сусідні апарати обмінюються інформацією про навколишнє середовище, розширюючи доступні один одному відомості про перешкоди, повітряні потоки та інші важливі параметри середовища.

На особливу увагу заслуговує питання забезпечення сталого польоту малорозмірних БПЛА, які більшою мірою схильні до нестійких потоків природної турбулентності атмосфери, особливо в умовах щільної міської забудови. Як один із способів вирішення цієї проблеми передбачається перехід від літакового крила або вертолітного гвинта до використання крил, що махають, на кшталт комах. Але навіть у разі успішного застосування такого маловивченого способу польоту, як і раніше, актуальним залишається пошук та своєчасне виявлення перешкод, якими можуть виступати будівлі, дерева, лінії електропередач, занадто потужні повітряні потоки і навіть зони дії ППО противника.

Спільне виконання групою БПЛА загального завдання потребує дотримання певних дистанцій між літальними апаратами та впорядкування їх

побудови. Наприклад, під час виконання завдань збору інформації про деяку територію, БПЛА повинні літати на таких дистанціях, щоб мінімізувати перекриття робочих зон сенсорних пристроїв, і водночас, не допускати «пробілів на карті». При роєвій взаємодії кожен апарат визначає дистанції до сусідніх до нього апаратів і коригує свій курс таким чином, щоб дотримуватися необхідних дистанцій між апаратами, і водночас не зближуватися надмірно з перешкодами.

Пропонується метод управління групою БПЛА на основі роєвого інтелекту для управління групою малорозмірних БПЛА використовувати роєвий підхід, придатний для всіх БПЛА. Доволі багаточисленна множина  $R$  БПЛА  $r_i (i=1, 2, \dots, N)$ , спільна взаємодія яких забезпечує вирішення деякої обмеженої кількості задач  $P = \langle p_1, p_2, \dots, p_c \rangle$  нехай називається роєм.

При цьому передбачається:

- всі БПЛА однакові;
- стан кожного БПЛА описується деяким вектором;
- БПЛА може виконувати певний обмежений набір найпростіших локальних дій;
- БПЛА може здійснювати інформаційний обмін з деякою підмножиною БПЛА, що знаходяться в межах певної зони, обмеженої радіусом  $L$ , яку в подальшому назвемо «зоною видимості» БПЛА. За допомогою цього інформаційного обміну БПЛА може бути доступна інформація про поточний стан і дії БПЛА підмножини  $R_i$ .
- БПЛА «знає» закони зміни свого стану в залежності від своїх дій, а також дій і станів інших БПЛА;
- під завданням, що стоїть перед роєм, розуміється досягнення роєм такого стану, коли є рішення задачі, при якому досягається мінімум деякого функціонала.

З урахуванням введених визначень завдання управління роєм БПЛА можна сформулювати наступним чином: знайти таку послідовність локальних дій всіх БПЛА рою, яка перетворює поточний стан рою в такий цільовий стан, відповідний поставленій перед роєм задачі, де досягається мінімум функціонала при визначених зв'язках

Пропонується використовувати наступний узагальнений алгоритм ройової взаємодії:

- всі БПЛА, що входять до складу рою, отримують з деякого пункту управління тип (номер)  $k$  завдання, що стоїть перед роєм;
- кожен БПЛА  $R_i$ , що входить до складу рою, визначає (або отримує по каналам зв'язку) інформацію про поточний стан і локальні дії БПЛА рою, що потрапляють в зону видимості;
- на підставі отриманих даних БПЛА визначає стан, в якому функція приймає мінімальне значення;
- БПЛА визначає дію, спрямовану на перетворення його поточного стану;
- БПЛА реалізує локальну дію, після чого переходить до пункту № 2.

### 3.3 Вирішення поставлених завдань

Розглянемо більш докладно завдання розподілу рою БПЛА на рівні дистанції один між одним. Таке завдання може ставитися при необхідності компактного розташування рою БПЛА без взаємних перешкод, або при виконанні завдань збору даних на великій території без «проломів» і з мінімальним перекриттям, обробки поверхонь тощо.

Нехай  $m$  – мінімальна допустима відстань між БПЛА,  $d$  – поточна дистанція між БПЛА  $R_i$  і  $R_j$ ,  $L$  – радіус видимості кожного БПЛА  $R_i$ . тоді при виконанні умови  $m < d < L$ , вектор результуючої сили  $\overline{F_{ij}(k)}$ , який визначає необхідну дію  $a_i$ , буде спрямований на БПЛА  $R_j$  і прямо пропорційний дистанції між ними  $d$  (3.1):

$$\begin{cases} \left| \overline{F_{ij}(k)} \right| \sim d, m < d < L \\ \left| \overline{F_{ij}(k)} \right| \sim d^{-1}, d < m < L \end{cases} \quad (3.1)$$

На рисунку 3.1 наочно показані вектора сили  $\overline{F_{ij}(k)}$  в залежності від поточної дистанції між БПЛА.

Під задачею баражування рою БПЛА  $R$  будемо розуміти таке просторове переміщення групи, при якому рій переміщається в певному напрямку і дистанції між БПЛА дотримуються. Таке завдання може ставитися при необхідності переміщення рою до місця виконання робіт, при зборі інформації про навколишнє середовище, при виконанні завдань гарантованої доставки та стабільної швидкості передачі Big Data і в ряді інших завдань.

У тому випадку, коли кожен БПЛА володіє інформацією про напрямок необхідного переміщення, завдання легко вирішується. Але, з огляду на специфіку ройового застосування великих груп БПЛА, оснащених малогабаритними приймальними пристроями, що діють в умовах недетермінованого середовища, а можливо, і в умовах організованої протидії інших сигналів, особливого значення набуває завдання баражування рою БПЛА за умови, що не всі БПЛА поінформовані про необхідний напрямок руху. Неповна інформованість роботів рою про напрямок руху також спостерігається при пошуку цілей: найближчі до мети роботи вже виявили мету і прямують до неї, тоді як у зоні видимості інших роботів ціль ще не з'явилася.

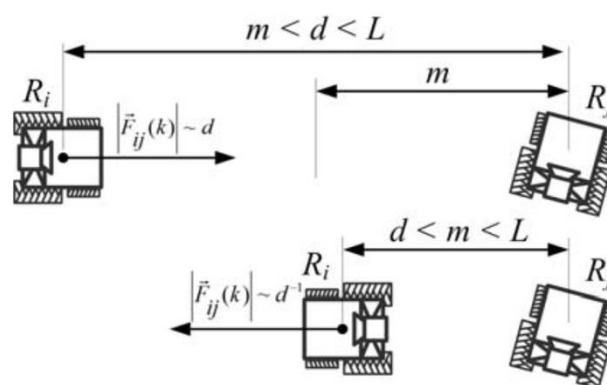


Рисунок 3.1 – Визначення сили взаємодії робота  $R_i$  з роботом  $R_j$

БПЛА групи, які володіють інформацією про необхідний напрямок руху, будемо називати «провідними» БПЛА. А інших – веденими. У провідних БПЛА формула розрахунку результуючої сили взаємодії (3.1) поповниться ще одним доданком – вектором необхідного руху, позначимо його  $\vec{F}_M$ . Тоді формула розрахунку результуючої сили  $\vec{F}_i(k)$  матиме вигляд (3.2):

$$\vec{F}_i(k) = \sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij}(k) + \vec{F}_{iB}(k) + \vec{F}_{iM}. \quad (3.2)$$

При цьому ведені БПЛА рухаються за колишніми правилами, за рахунок «тяжіння» і «відштовхування» щодо провідних БПЛА і один одного, весь рій буде здійснювати спрямований рух в заданому напрямку.

Очевидно, що завдання баражування рою БПЛА має практичне значення тільки в разі якщо БПЛА здатні обходити перешкоди. Будемо розглядати випадок, коли БПЛА не мають апріорної інформації про розташування непереборних перешкод на шляху руху, а також БПЛА, які виявили перешкоду не здатні передавати інформацію про нього іншим БПЛА рою.

Тоді формула розрахунку результуючої сили взаємодії (3.1) поповниться ще одним доданком – вектором, що лежить на нормалі до перешкоди, але спрямованого в протилежну від перешкоди сторону, позначимо його  $\vec{F}_{iH}$

Тоді формула розрахунку результуючої сили  $\vec{F}_i(k)$  матиме вигляд:

$$\vec{F}_i(k) = \sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij}(k) + \vec{F}_{iB}(k) + \vec{F}_{iH} \quad (3.3)$$

У ряді практичних завдань, що виконуються групою БПЛА, необхідно забезпечити баражування рою БПЛА, або його частини (кластера, підгрупи)

до певної мети. Прикладом такої мети може служити місце дозаправки енергоносієм, зона впевненого прийому сигналу, місце передачі Big Data.

Залежно від характеру інформаційного обміну в рої БПЛА, можливі два сценарії:

- БПЛА, який знайшов мете, повідомляє сусіднім БПЛА координати цілі, ті передають «по ланцюжку» цю інформацію своїм сусідам, і незабаром всі БПЛА рою мають інформацію про місцезнаходження цілі і можуть рухатися в цьому напрямку;

- БПЛА, який знайшов мете, не може повідомити її координати іншим БПЛА рою.

Так як в першому випадку дії рою БПЛА цілком очевидні, розглянемо другий сценарій. БПЛА, який знайшов мете, може спрямуватися до неї, але не може повідомити іншим БПЛА про причини зміни напрямку свого руху. У цьому випадку він стає «провідним».

Решта «ведені» БПЛА, що є сусідами з «провідним», будуть «притягатися» до нього і змушені будуть слідувати за ним. БПЛА, в зону видимості яких ведучий БПЛА спочатку не потрапляв, будуть притягатися до тих БПЛА, які слідують за ведучим, і також зміщуватися у напрямку прямування ведучого БПЛА.

В результаті рій БПЛА буде слідувати за провідним БПЛА. При наявності декількох провідних БПЛА, що рухаються до різних цілей, рій буде змушений розділитися на частини (кластери, підгрупи), кожна з яких піде за одним з провідних БПЛА.

Працездатність запропонованого підходу до управління роєм БПЛА була підтверджена за допомогою програми, яка виконувала керуючий моділь під час дослідної експлуатації (рисунок. 3.2).

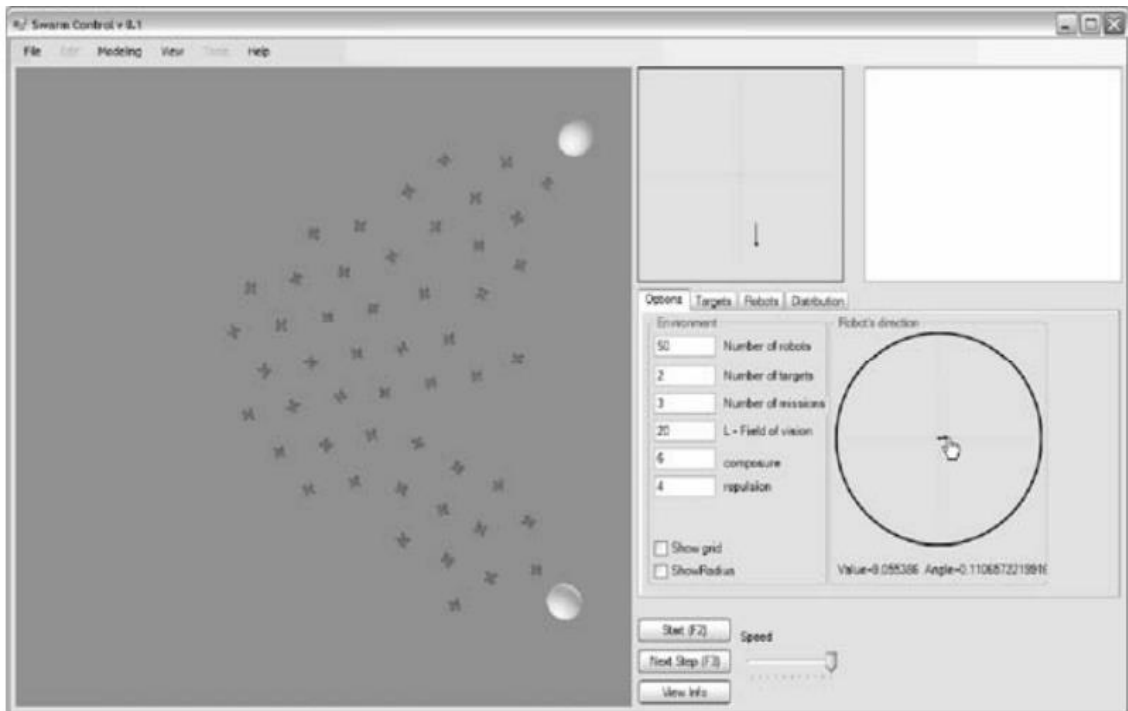


Рисунок 3.2 – Результати програмного моделювання

### 3.4 Система зв'язку передачі даних

Багато завдань, які вирішують сучасні комплекси безпілотних літальних апаратів (БПЛА), потребують наявності високошвидкісних ліній передачі інформації між БПЛА та наземним комплексом управління (ПКУ) [1]. Наприклад, завдання оперативного моніторингу або розвідки за допомогою технологій БПЛА передбачають одержання на борту та доставку на ПКУ растрових зображень різної роздільної здатності, які отримуються з датчиків різних діапазонів довжин хвиль. Найбільш поширена на сьогоднішній день технологія передачі інформації полягає в безперервній трансляції зображення в міру його одержання в цифровому або аналоговому форматі, структура якого не змінюється протягом усього польоту. Необхідно врахувати, що безперервна трансляція зображень має такі особливості:

- значна частина візуальної інформації може не мати шуканих ознак;
- відсутня гарантія достовірної доставки інформації;

- потрібно постійне випромінювання сигналу передавачем, що дозволяє легко виявити БПЛА та встановити його координати.

Існуюча технологія доставки зображення не ефективно використовує ресурси радіоканалу. У зв'язку з цим стає актуальним вирішення наступних завдань:

- реалізація функції гарантованої доставки (особливо для зображень високого просторового дозволу);
- реалізація адаптивного зниження дозволу відеопотоку залежно від актуального бюджету каналу зв'язку;
- реалізація можливості отримання минулого знімка в повному дозволіні з метою уточнення деталей зображення;
- створення адаптивної системи передачі інформації, здатної ефективно використовувати енергетичний та спектральний ресурс каналу зв'язку [2-4].

Як правило, на борту БПЛА розміщуються не менше двох систем зв'язку: дуплексна/напівдуплексна апаратура передачі командно-телеметричної інформації та симплексна система передачі інформації корисного навантаження [1]. Апаратура передачі командно-телеметричної інформації призначена для низькошвидкісної передачі командної інформації з ПКУ на борт БПЛА та низькошвидкісної передачі телеметричної інформації з борту БПЛА на ПКУ. Апаратура передачі інформації корисного навантаження призначена для односторонньої високошвидкісної передачі інформації корисного навантаження з борту БПЛА на ПКУ. На рисунку 3.3 показано можливі варіанти реалізації систем зв'язку комплексів БПЛА.

Прямий зв'язок між БПЛА та ПКУ в діапазонах НВЧ можливий тільки в межах прямої видимості. Для підвищення надійності комплексу БПЛА на борту встановлюються кілька приймачів різних діапазонів довжин хвиль [1]. Передача телеметричної інформації при польотах великі відстані може здійснюватися з допомогою супутникових систем зв'язку (Iridium, Globalstar та інших.). Високошвидкісна передача інформації корисного навантаження

може також здійснюватись через малорозмірні супутникові термінали, що потребує встановлення на борт ЛА високонаправленої антени з можливістю сканування. У найпростішому випадку це параболічна антена на опорно-поворотному пристрої.

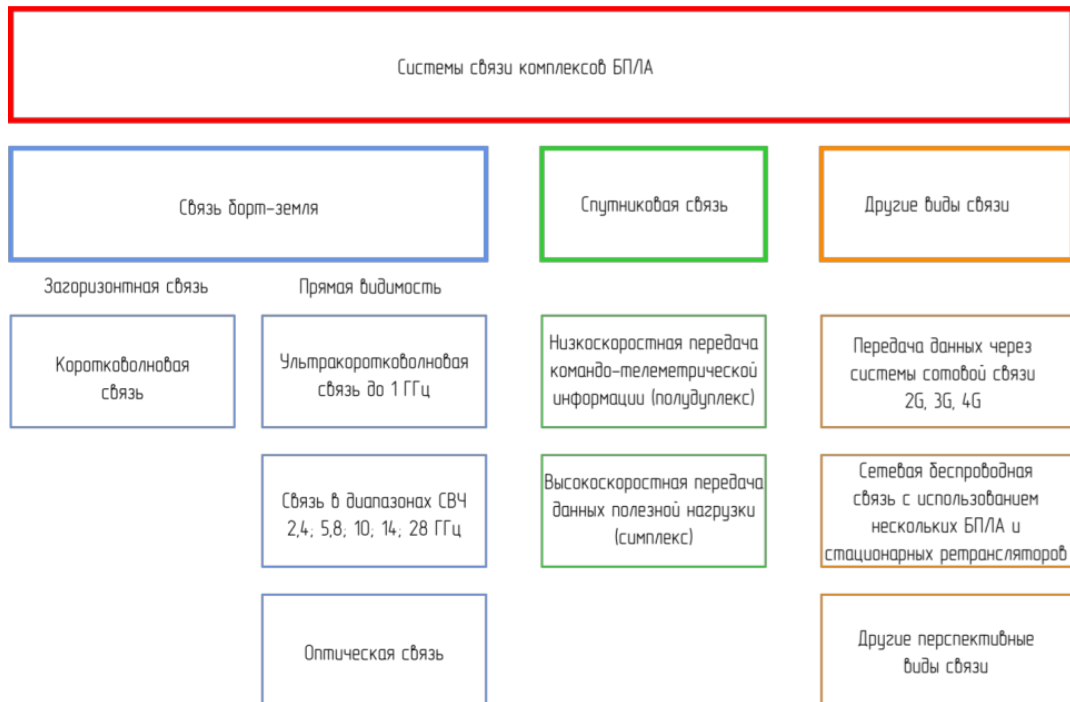


Рисунок 3.3 – Системы зв'язку комплексів БПЛА

Незважаючи на велику кількість можливих варіантів реалізації систем передачі командно-телеметричної інформації та інформації корисного навантаження, оптимальним та найчастіше використовується залишається вид зв'язку, при якому дані передаються безпосередньо між БПЛА та ПКУ. У цьому випадку вдається реалізувати можливість передачі інформації з великою швидкістю, недоступною для супутникових систем зв'язку, і при цьому не залежати від стаціонарних цивільних систем зв'язку. Одним із обмежувальних факторів є відстань радіовидимості між БПЛА та ПКУ (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Відстань радіовидимості між БПЛА та ПКУ

Висота польоту БПЛА, м	Дальність видимості (відстань до радіогоризонту), км			
	При висоті підйому антени ПКУ, м			
	1	10	20	30
100	39	47	52	55
250	60	68	72	76
500	83	91	96	99
750	101	109	114	117
1000	117	124	129	132
1500	142	150	154	158
2000	163	171	176	179
3000	199	207	212	215
4000	229	237	242	245
5000	256	264	268	272
6000	280	288	293	296
7000	302	310	315	318
8000	323	331	335	339
9000	342	350	355	358
10000	361	368	373	377

Без урахування рефракції в атмосфері та за відсутності перешкод на шляху розповсюдження радіохвиль існує можливість організації прямого зв'язку між БПЛА та ПКУ на відстані до 200-300 км. Для підвищення дальності роботи системи зв'язку необхідно збільшувати висоту польоту ЛА та використовувати щоглові споруди для антени ПКУ (рисунок 3.4).

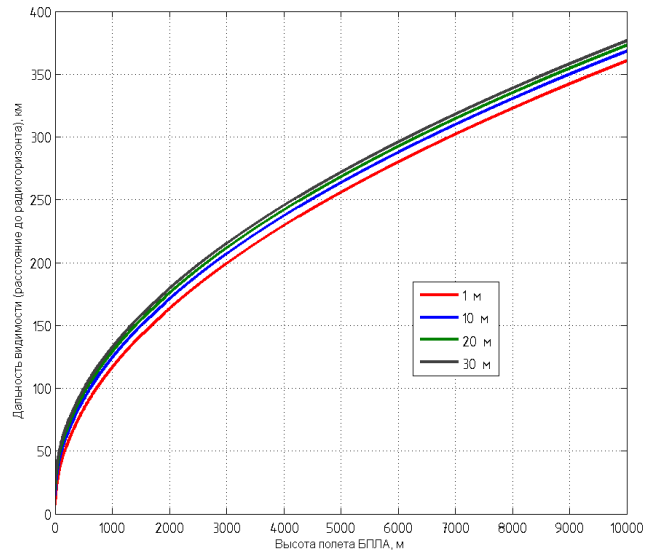


Рисунок 3.4 – Дальність прямої видимості БПЛА в залежності від висоти польоту та висоти підйому антени ПКУ

Велика відстань між БПЛА та ПКУ призводить до великого загасання сигналу на трасі (рисунок 3.5), яке необхідно компенсувати підвищенням вихідної потужності сигналу передавачів та використанням антенних систем з більшим коефіцієнтом посилення.

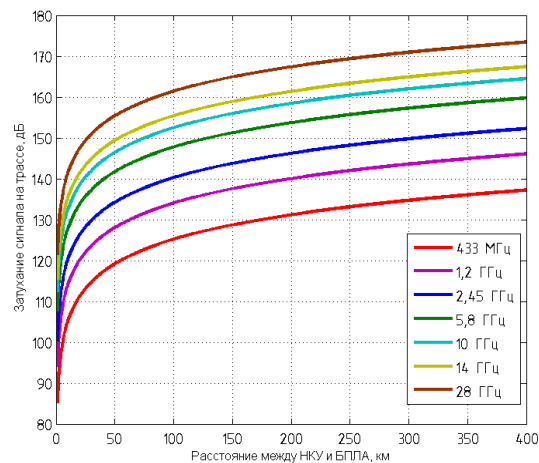


Рисунок 3.5 – Загасання сигналу на трасі для різних діапазонів довжин хвиль і за різної відстані між БПЛА та ПКУ

Передача інформації з високою швидкістю (десятки та сотні Мбіт/с) можлива лише в діапазонах частот вище 1 ГГц. Для компенсації великого згасання на трасі у цих діапазонах частот можуть бути використані параболічні антени великого діаметру (рисунок 3.5). Пересувні комплекси управління БЛПА повинні бути обладнані опорно-поворотними пристроями з параболічними антенами діаметром від 1 до 3 м, у стаціонарних станціях управління БЛПА можуть бути використані антени більшого діаметра.

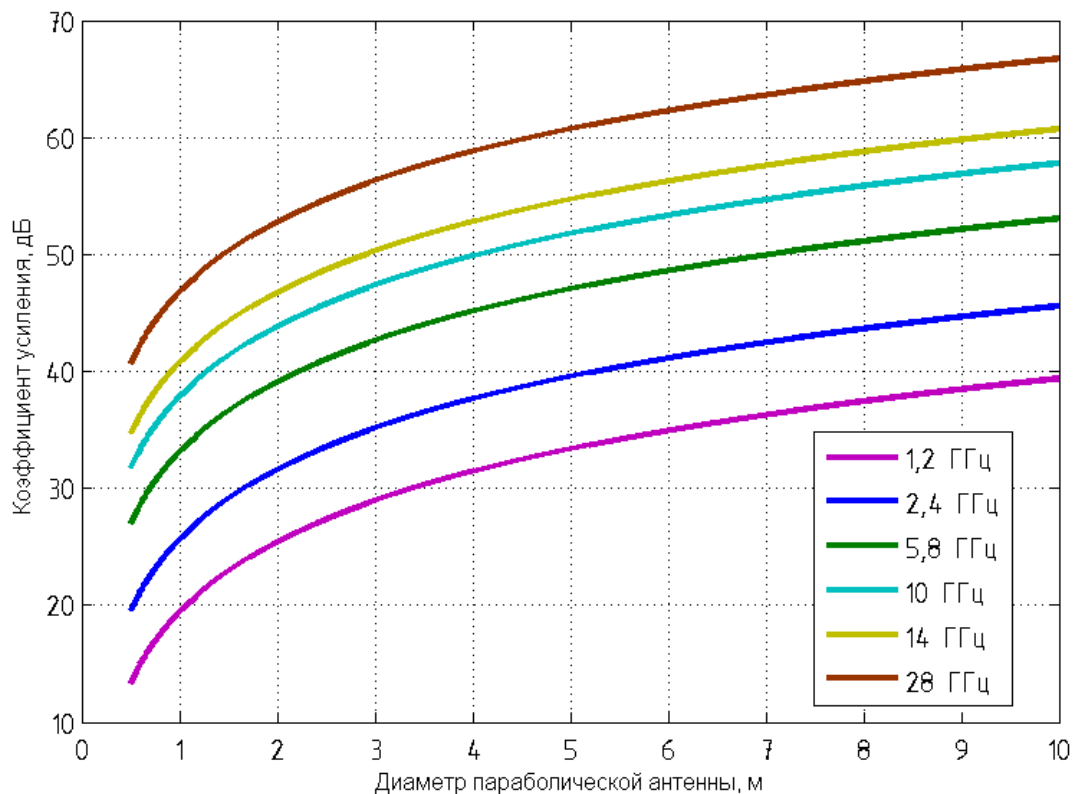


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта посилення параболічної антени від діаметра дзеркала для різних діапазонів

Для розрахунку бюджету каналу передачі інформації між БЛПА та ПКУ необхідно розрахувати потужність теплового шуму на вході приймача, яка залежить від смуги пропускання аналогового тракту (рисунок 3.6).

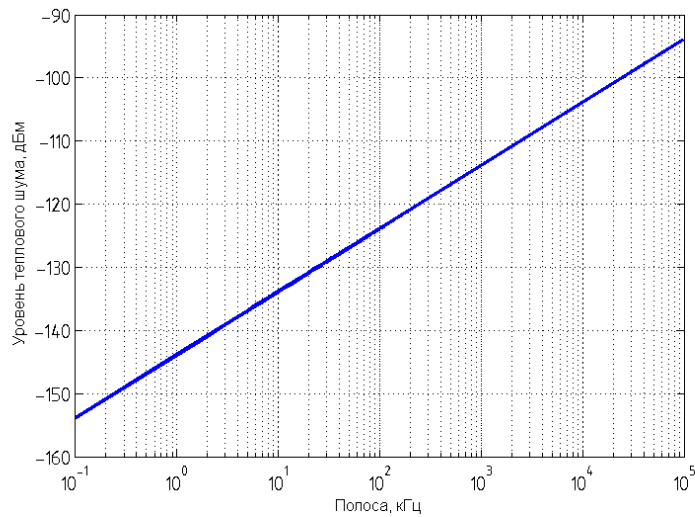


Рисунок 3.6 – Залежність потужності теплового шуму на вході приймача від ширини смуги пропускання аналогового тракту

У таблиці 3.2 наведено аналіз бюджету каналу зв'язку для робочого діапазону част- 2,4 ГГц, відстані між БПЛА і ПКУ 150 км і смугі частот 20 МГц.

Таблиця 3.2 – Аналіз бюджету каналу зв'язку від БПЛА до ПКУ

№	Позиція	Посилення/ослаблення, дБ (дБм)	Разом, дБм
1	Вихідна потужність передавача	+30	+30
2	Втрати у фідері та роз'ємах БПЛА	-1,5	+28,5
3	Посилення антени БПЛА	+10	+38,5
4	Втрати поширення (2,4 ГГц, 150 км)	-145	-106,5
5	Посилення антени ПКУ	+30	-76,5
6	Втрати у фідері та роз'ємах ПКУ	-1,5	-78
7	Рівень шуму на вході приймача (смуга 20 МГц)	-100	
	Відношення сигнал/шум	+22 дБ	

Як очевидно, для забезпечення бюджету каналу зв'язку при великому згасанні сигналу на трасі необхідно використовувати спрямовані антени на борту БПЛА. Завдання управління напрямом максимального посилення бортової антени може бути вирішене декількома способами.

Спосіб 1. Використання багатоеlementної антеної решітки з керованою діаграмою спрямованості.

Спосіб 2. Використання декількох антен, що перемикаються.

Спосіб 3. Встановлення антени на опорно-поворотному пристрої.

Розглянемо ці методи окремо.

Метод 1. Кільцева антенна решітка (рисунок 3.7) може бути використана для створення антеною системи з керованим напрямом максимуму діаграми спрямованості. Завдяки кільцевій симетрії антеної решітки вдається отримати спрямовані діаграми, які мало змінюються при скануванні в межах  $360^\circ$  у площині решітки.

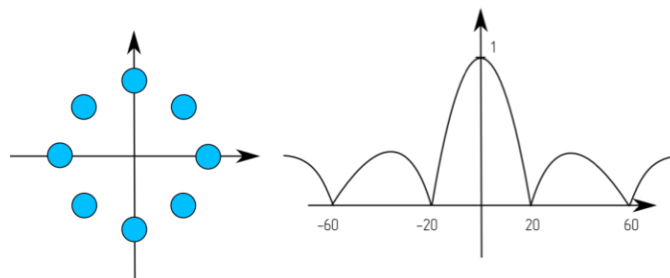


Рисунок 3.7 – Кільцева антенна решітка

Для отримання великого коефіцієнта посилення кільцевої антеної решітки необхідно збільшувати кількість елементів (32, 64 і більше). Перевагою антеної решітки є можливість немеханічного сканування як в азимутальній площині, так і кутом місця. При цьому під час сканування передача може не перериватися. Використання багатоеlementної антеної решітки ускладнюється необхідністю виготовлення складних і дорогих діаграмоутворювальних пристроїв.

Метод 2. При використанні кількох перемикаються гостронаправлених антен просторові напрямки по азимуту розбиваються на сектори (рисунок 3.8). Мінімальна кількість антен – 4, у цьому випадку ширина діаграми спрямованості має становити близько  $90^\circ$ . При використанні широко поширених патч-антен з шириною діаграми спрямованості близько  $60^\circ$  число секторів дорівнює 6. Зі збільшенням коефіцієнтів посилення антен число зон зростає, для розміщення великої кількості антен необхідно збільшувати габаритні розміри і масу всієї антеної системи. Наявність елементів, що перемикаються, неминуче призводить до перерв у передачі інформації.

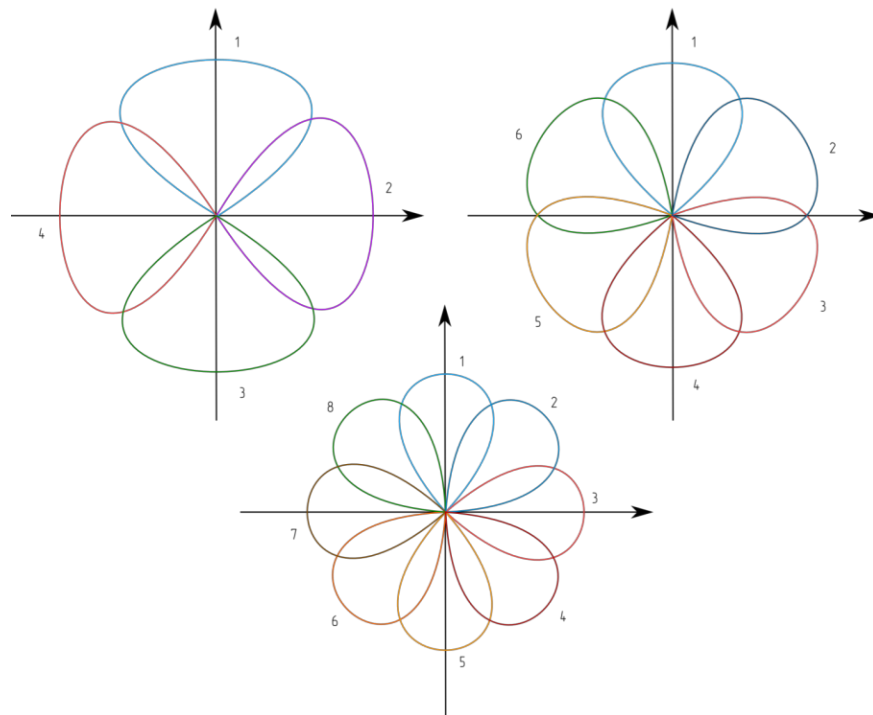


Рисунок 3.8 – Масив перемикаються гостроспрямованих антен

За наявності кількох антен на борту ЛА виникає потреба вибору антени, спрямованої у бік ПКУ, потрібна комутація сигналів. Можливі кілька варіантів реалізації такої системи:

Варіант А. Перемикавання виходу підсилювача потужності передавача між антенами (один передавач, один підсилювач потужності, кілька антен).

Варіант Б. Перемикання виходу передавача між підсилювачами потужності та антенами (один передавач, кілька поєднаних підсилювачів потужності та антен).

Варіант В. Перемикання цифрового сигналу між передавачами (кількість передавачів і підсилювачів потужності дорівнює числу антен).

Розглянемо ці варіанти окремо.

Варіант А. У найпростішому випадку вихідний сигнал підсилювача потужності комутується між кількома антенами.

Перевагою цього варіанта є використання єдиного модуля, що передає, і підсилювача потужності для роботи на кілька антенних пристроїв. Недоліками є: втрати в пристрої, що комутують; наявність обмежень щодо рівня потужності для напівпровідникових комутаторів.

Швидкодіючі напівпровідникові комутатори мають великі втрати (0,3...2 дБ) і малу допустиму потужність: точка децибельної компресії в основному перебуває до +30...40 дБм. Електромеханічні комутатори розраховані на великі потужності та мають малі втрати (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Електромеханічний комутатор DowKey 581-420802A

Недоліком електромеханічних комутаторів є високий час перемикання (до 20 мс для DowKey 581-420802A) та висока ціна.

Варіант Б. Для зняття обмежень, які накладає комутатор НВЧ-сигналів,

підсилювач потужності передавача може бути винесений за перемикач. У цьому випадку кількість підсилювачів потужності дорівнює числу антен.

До недоліків такого підходу можна віднести: наявність кількох підсилювачів потужності, якими потрібно керувати (вмикати/вимикати при перемиканні антен); підсилювачі НВЧ-сигналів високої потужності (понад 1 Вт) займають багато місця та мають велику масу. Для цього варіанта необхідно розробляти єдиний багатоканальний блок підсилювачів потужності із загальною системою живлення та охолодження.

Варіант В. Третій підхід передбачає відмову від перемикачів НВЧ-сигналів ціною використання для кожної антени свого передавача та підсилювача потужності. У цьому випадку перемикач сигналів виконується на рівні цифрової логіки (всередині ПЛІС або мікроконтролером).

До переваг даного підходу слід віднести високу надійність системи: навіть у разі виходу з ладу одного з каналів передачі інформації, інші залишаються робітниками, забезпечуючи зв'язок в азимутальних секторах.

Метод 3. Установка антени на опорно-поворотному пристрої дозволяє використовувати одну гостроспрямовану антену для безперервного стеження за напрямленням на ПКУ без розривів зв'язку. При встановленні антени на опорно-поворотному пристрої головним завданням є створення переходу, що обертається, який може бути розміщений в різних місцях:

Варіант А. НВЧ-перехід, що обертається, розміщується перед антеною і після підсилювача потужності.

Варіант Б. Перехід, що обертається, розміщується після передавача і перед підсилювачем потужності та антеною.

Варіант В. Передавальний пристрій, підсилювач потужності та антена розміщуються на поворотному пристрої, через багатоканальний обертовий перехід передаються цифрові сигнали та напруга живлення.

Коаксіальний перехід НВЧ-сигналу, що обертається, є складним пристроєм і, як правило, може пропускати через себе високі потужності при низьких втратах (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Коаксіальний перехід, що обертається Diamand satcom 18-2124-0

До недоліків використання коаксіального НВЧ-переходу, що обертається, потрібно віднести: високу вартість, великі терміни поставки.

Крім того, при встановленні на опорно-поворотний пристрій тільки антени або антени і підсилювача потужності решту обладнання необхідно розміщувати якомога ближче до переходу, що обертається, тобто під опорно-поворотним пристроєм. Остроспрямована антена може бути виконана або як плоска антена (антенні решітки, апертурні антени), або як антена з розташуванням елементів вздовж випромінювання (наприклад, антени хвилі, що біжить: спіральна, вібраторна). Таким чином, при розміщенні такого об'єкта на опорно-поворотному пристрої, велика частина поверхні поворотної платформи залишається невикористовуваною. Для підвищення ефективності використання площі поворотної платформи необхідно розміщувати на ній, крім антени, передавальне обладнання та підсилювач потужності. У цьому випадку потрібний простий багатоканальний обертовий перехід. Необхідною вимогою такого переходу є можливість передачі таких сигналів, як Gigabit Ethernet, і можливість передачі великих струмів для живлення вихідного підсилювача потужності (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Перехід, що обертається АС7195

Таким чином, оптимальним є використання опорно-поворотної платформи, на якій розміщується все приймальне обладнання. На рисунку 3.12 показана модель розробленої платформи для БЛПА із злітною масою понад 30 кг.

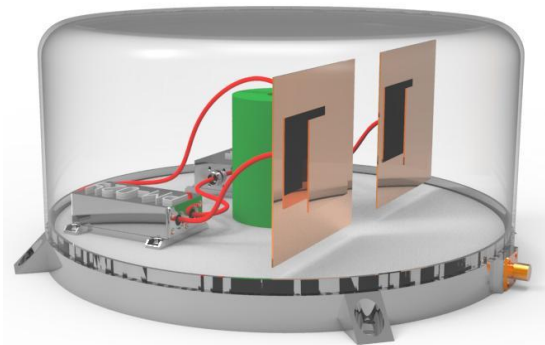


Рисунок 3.12 – Модель поворотної платформи з антенами, приймачем та підсилювачем потужності

Орієнтація поворотної платформи у просторі має здійснюватись за сигналами від автопілота, який безперервно обчислює вектор спрямування на ПКУ. Для підвищення ефективності антенного обладнання на поворотній платформі необхідно використовувати антени з круговою поляризацією та збільшувати їхню апертуру за рахунок створення антенних решіток у горизонтальній площині. Звуження діаграми спрямованості у горизонтальній площині дозволить підвищити коефіцієнт посилення антени за постійної ширини діаграми спрямованості у вертикальній площині, що гарантує можливість наведення антени за будь-яких допустимих кутів польоту ЛА.

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі описані принципи роботи передачі даних, основна їх характеристика, описані сучасні технології передачі даних з мінімальною втратою, також наведено приклади безконтактних технологій використані на вузлах високомобільної мережі.

Були розглянуті алгоритми для маршрутизації Fanet, на основі яких стояв зв'язок із БПЛА. Були описані основні принципи методів маршрутизації, такі як швидка побудова маршруту, мале навантаження на мережу, надійна доставка пакетів та інші. Також був описаний так званий BeeAdHoc алгоритм, завдяки якому будується система для ефективності та високоорганізованості, велика масштабність, підстроювання під сучасне середовище.

Розглянуто сучасні методи стиснення відео, а також етапи процедури стиснення, в які входить етап попередньої обробки, основне перетворення, кодування та упаковка компонентів кодування. Також були порушені стандарти стиснення відео, які забезпечують передачу з мінімальною затримкою та високою швидкістю.

Зроблено висновки щодо передачі даних на основі БПЛА, з методом роєвої взаємодії, що забезпечує зв'язок з апаратами поблизу один до одного і можуть мати різні завдання.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шикін А.В., Боресков А.В. Комп'ютерна графіка. Полігональні моделі. - М.: ДІАЛОГ-МІФІ, 2001. - 464 с
2. Назаров О.М., Симонов М.В. Високошвидкісні асинхронні мережі АТМ. Еко-Трендз: М., 1997.
3. Андреа, Голдсміт Бездротові комунікації / Голдсміт Андреа. - М: Техносфера, 2011
4. Beni G., Wang J. Swarm intelligence in cellular robotic systems // Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics. Springer, 1993. P. 703-712.
5. Курейчик В. М., Кажаров А. А. Використання роєвого інтелекту у вирішенні NP-важких завдань // Вісті ЮФУ Технічні Науки. 2011. Вип. 7, No 120. С. 30-36.
6. Курейчик В. В., Запорожець Д. Ю. Ройовий алгоритм у задачах оптимізації // Вісті ЮФУ Технічні Науки. 2010. Вип. 7, No 108. С. 28-32.
7. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // Artif. Intell. Rev. 2009. V. 31, No 1-4. P. 61-85.
8. Маха J.-А., Mahmoud M.-S.B., Larrieu N. Survey on UAANET Routing Protocols and Network Security Challenges // Ad Hoc Sens. Wirel. Netw. 2017.
9. Lučić P., Teodorović D. Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems // Int. J. Artif. Intell. Tools. 2003. V. 12, No 3. P. 375-394.
10. Кальчевська П. І., Леванова Т. В. Алгоритм бджолиного рою для розміщення підприємств з обмеженнями на обсяги поставок. Сибірська державна автомобільно-дорожня академія (СібаДІ), 2015. С. 1833-1837.
11. Курейчик В. В., Жиленков М. А. Бджолиний алгоритм для вирішення оптимізаційних завдань з явно вираженою цільовою функцією // Інформатика, обчислювальна техніка та інженерна освіта. 2015. Вип. 1, № 21.

C. 1–8.

12. Teodorović D. Bee Colony Optimization (BCO) // Innovations in Swarm Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. P. 39-60.

13. Pham D. T., Haj Darwish A., Eldukhri E. E. Optimisation of fuzzy логічний контролер за допомогою algorithm // Int. J. Comput. Aided Eng. Technol. 2009. V. 1, No 2. P. 250-264.

14. Yang X.-S. Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms // Artif. Intell. Knowl. Eng. Appl. Bioinspired Approach. 2005. P. 317-323.

15. Karaboga D., Basturk B. На виконанні артеріальної глибини колонії (ABC) algorithm // Appl. Soft Comput. 2008. V. 8, No 1. P. 687-697.

16. Wedde H. F., Farooq M., Zhang Y. BeeHive. An efficient fault-tolerant routing algorithm inspired by honey bee behavior // Lect. Notes Comput. SCI. 2004. V. 3172. P. 83-94.

17. Davidovic T., Teodorovic D., Selmic M. Bee Colony Optimization - part I: The algorithm overview // Yugosl. J. Opera. Res. 2015. V. 25, No 1. P. 33-56.

18. Teodorovic D., Selmic M., Davidovic T. Bee Colony Optimization - Part II: The application survey // Yugosl. J. Opera. Res. 2015. V. 25, No 2. P. 185-219.

19. Wei S. та ін. al. Simulation study unmanned aerial vehicle communication networks addressing bandwidth disruptions / ed. Pham K.D., Cox J.L. 2014. P. 908500-1-908500-10.

20. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2015. P. 1–32.

21. Bekmezci İ., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Netw. 2013. V. 11, No 3. P. 1254-1270.

22. Sahingoz O. K. Networking Models в Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges // J. Intell. Robot. Syst. 2014. V. 74, No 1–2. P. 513-527.

23. Saleem Y., Rehmani M. H., Zeadally S. Integration of Cognitive Radio Technology with unmanned aerial vehicles: Issues, opportunities, і майбутні

дослідження challenges // J. Netw. Comput. Appl. 2015. V. 50. P. 15-31.

24. Temel S., Bekmezci? İ. На розробці витікаючих мереж ad hoc (FANETs) використовуючи невеликий простір високої кількості платформ (HAPs) // IEEE International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2013. P. 461-465.

25. Bee-Inspired Protocol Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 319 p.

26. Farooq M. Bee-inspired routing protocols for mobile ad hoc and sensor networks // Bee- Inspired Protocol Engineering. Springer, 2009. P. 235-270.

27. H. F. Wedde, M. Farooq, C. Timm. BeeAdHoc: Efficient, Secure і Scalable Routing Framework для Mobile AdHoc Networks: Технологічний report PG460. School of Computer Science: University of Dortmund, 2005. P. 263.

28. Боронін П. Н., Кучерявий А. Є. Інтернет речей як нова концепція розвитку мереж зв'язку // Інформаційні технології та телекомунікації. 2014. Вип. 3, No 7. С. 7-30.

29. Ahmed A., Ogunbiyi O., Aduragba T. Optimal Data Collection від Network using Probability Collectives (Swarm Based). 2015. V. 3, No 4. P. 49-58.

30. Дорохова А. А., Парамонов А. І. Дослідження трафіку і якості обслуговування в мережах, що самоорганізуються, на базі БПЛА // Інформаційні технології та телекомунікації. 2016. Вип. 2, No 4. С. 12-25.

31. Singh K., Verma A. K. Досвідчений аналіз AODV, DSDV та OLSR реєстраційний протокол для витікання електронних мереж (FANETs) // IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). 2015. P. 1-4.

32. Qazi S. та ін. An Architecture for Real Time Monitoring Aerial Adhoc Network // IEEE International Conference on Frontiers of Information Technology. 2015. P. 154-159.

33. Li Y., St-Hilaire M., Kunz T. Improving routing в мережах UAVs шляхом скопіювання flooding and mobility prediction // IEEE Wireless Days, IFIP. 2012. P. 1-6.

34. Bettstetter C., Resta G., Santi P. Розділ розподілу з рівнем waypoint mobility model для бездротових мереж ad hoc // IEEE Trans. Mob. Comput. 2003. V. 2, No 3. P. 257-269.
35. Bouachir O. та ін. A mobility model for UAV Ad hoc network // IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2014. P. 383-388.
36. Broch J., Maltz D. A., Johnson D. B. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks // Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 1999. (I-SPAN'99) Proceed Fourth International Symposium on. IEEE, 1999. P. 370-375.
37. Liu J. та ін. Перейти до завершення в мобільних мережах ad hoc з загальним розподілом трансмісії і обмеженим пакетом redundancy // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2012. P. 1731-1736.
38. de Moraes R. M., Sadjadpour H. R., Garcia-Luna-Aceves J. J. Схема-дизайн analysis of mobile ad-hoc мережі з multi-copy relaying strategy // IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2004). P. 200-209.
39. Jacquet P., Viennot L. Overhead в Mobile Ad-Hoc Network Protocols. 2000.
40. Broch J., Maltz D. A., Johnson D. B. Діяльність comparison of multi-hop бездротова мережа мережевих мереж routing // IEEE International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (I-SPAN'99). 1999. P. 370-375.
41. Ватолін Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкін В. Методи стиснення даних. Пристрій архіваторів, стиснення зображень і відео. М.: ДІАЛОГ-МІФІ, 2003. 384 с.
42. Селомон Д. Стиснення даних, зображень та звуку. М: Техносфера, 2004. 368 с.
43. Семенюк В.В. Економне кодування дискретної інформації. СПб:

СПБГІТМО (ТУ), 2001. 115 с.

44. Річардсон Я. Відеокодування. H.264 та MPEG-4 – стандарти нового покоління. М: Техносфера, 2005. 368 с.

45. Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC), 2003.

46. Image and Video Coding – Emerging Standards and Beyond. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 1997. V. 8. No 7. P. 814-837.

47. ITU-T Recommendation H.264 (03/2005) / Prepublished version.

48. Thomas Wiegand, Gary J. Sullivan, Gisle Bjontegaard, Ajay Luthra. Завантажити H.264/AVC Video Coding Standard. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, July 2003.

49. Ожиганов А.А., Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Модифікований фрактальний метод стиснення багаторівневих зображень.// Інформаційні технології. 2003. № 4.

50. Трубніков Г.В. Застосування безпілотних літальних апаратів у цивільних цілях

51. Mrema D. D., Shimamoto S. Формування Quadrifilar Helix Antenna на EAD Channel Model для UAV до LEO Satellite Link // IEEE International Conference on Collaboration Technologies and Systems (Denver, 21-25 May 2012). Piscataway: IEEE, 2012. P. 170-175.

52. Соколов В.Б., Теряев О.Д. Безпілотні літальні апарати: деякі питання розвитку та застосування (огляд за матеріалами публікацій в Інтернеті) // Мехатроніка, автоматизація, керування. - 2008. - № 2. - С. 12-23.

53. Амелін К.С., Антал Є.І., Васильєв В.І., Гранчина Г.О. Адаптивне керування автономною групою безпілотних літальних апаратів // Стохастична оптимізація в інформатиці. - 2009. - Т. 5, № 1-1. - С. 157-166.

54. Попов В.А., Федутінов Д.В. Розвиток напряму мініатюрних безпілотних літальних апаратів за кордоном // ФГУП «ДержНДІАС» ([http://uav.ru/articles/mav\\_abroad.pdf](http://uav.ru/articles/mav_abroad.pdf)).

55. Dorigo M., Birattari M. Swarm intelligence // Scholarpedia. - 2007. - № 2 (9).

56. Ткачов В.М. Метод попередньої обробки нееластичних даних на вузлах високомобільної комп'ютерної мережі / В.М. Ткачов, Д.Є. Фролов, В.О. Яхно / / Зб. тез. доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми інформатизації". Т. 1. – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Харків, 24-25.11.2022. – С. 32.