ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ’ЯЗКУ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61 спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Зозуляк В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Макаренко А.О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Лавріненк К.Г.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Макаренко А.О.
(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МВТ
_____ Н.В. Руденко
“ ” _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Зозуляку Владиславу Володимировичу

1. Тема роботи: “Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв’язку для збільшення їх пропускної здатності”,
керівник роботи Макаренко Анатолій Олександрович, д.т.н., професор,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 12 жовтня 2022 р. №122.

2. Строк подання студентом роботи 20 грудня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи:
   1. Супутникові системи зв’язку.
   2. Методи збільшення пропускної здатності ССЗ.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Інженерія систем супутникового зв’язку.
   2. Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв’язку для збільшення їх пропускної здатності.
   3. Імітаційне моделювання розробленого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв’язку.

5. Графічна частина роботи представлена на 12 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	15.10.22	Викон.
2.	Інженерія систем супутникового зв'язку	31.10.22	Викон.
3.	Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності	15.11.22	Викон.
4.	Імітаційне моделювання розробленого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку	29.11.22	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	10.12.22	Викон.
6.	Розробка презентації	20.12.22	Викон.

Студент _____ Зозуляк В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Макаренко А.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 72 сторінок, 20 рисунок, 7 таблиць, 26 джерел.

Об'єкт дослідження – процес функціонування супутникових систем зв'язку.

Предмет дослідження – методи збільшення пропускної здатності супутникових систем зв'язку.

Мета роботи – розробити алгоритм маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності.

Методи дослідження. Дослідження виконано на основі використання основних положень теорії інформації та передавання сигналів; методів теорії розповсюдження електромагнітних хвиль; методів маршрутизації; методів комп'ютерного моделювання; математичної статистики.

У першому розділі розглянуто технології супутникового зв'язку. Розглянуто наступні питання: початковий етап супутникового зв'язку; основні визначення супутникової системи зв'язку; процес регулювання супутникового зв'язку.

У другому розділі поставлена задача дослідження і виконано розробку алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності. Показано, що пропускна здатність НГССЗ - цінний ресурс. Абоненти розподілені нерівномірно по поверхні Землі. Наслідком цього є нерівномірний розподіл потоків даних між супутниками, що призводить до втрати пакетів даних. Для запобігання втрат пакетів необхідно розробити ефективний алгоритм маршрутизації з балансуванням навантаження, що і виконано.

У третьому розділі виконано імітаційне моделювання дослідження ефективності розробленого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку. Дослідження показало, що запропонований алгоритм маршрутизації забезпечує низьку ймовірність втрати пакетів при переповненні вихідних буферів міжспутникових ліній і високу пропускну здатність НГССЗ.

СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, НГССЗ, МАРШРУТИЗАЦІЯ, АЛГОРИТМ, НЕГЕОСТАЦІОНАРНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ, БАГАТОШЛЯХОВА МАРШРУТИЗАЦІЯ, ЗАТРИМКИ ПАКЕТІВ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 8
ВСТУП 9
1 ІНЖЕНЕРІЯ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 12
1.1 Початковий етап супутникового зв'язку 12
1.2 Деякі основні визначення супутникової системи зв'язку 23
1.3 Процес регулювання супутникового зв'язку 29
2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ 33
2.1 Постановка завдання дослідження 33
2.2 Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку 42
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 51
3.1 Імітаційна модель супутникової системи 51
3.2 Порівняння запропонованого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку з іншими алгоритмами 56
ВИСНОВКИ 67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 69
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

FCC - Federal Communications Commission - Федеральна Комісія Зв'язку;

FM - frequency modulation - частотна модуляція;

FSK - frequency shift keying - частотна маніпуляція;

GEO - geostationary satellite orbits - геостаціонарні супутникові орбіти;

GSO - geosynchronous satellite - геосинхронний супутник;

HEO - high elliptical earth orbit, high earth orbit - висока еліптична земна орбіта, висока земна орбіта;

IF - проміжні частоти;

LEO - low earth orbit - низька навколоземна орбіта;

MEO - medium earth orbit - середня навколоземна орбіта;

NGSO - non geosynchronous (or geostationary) satellite orbits - негеосинхронні (або геостаціонарні) супутникові орбіти;

QoS - Quality of service - Якість обслуговування;

RF - radio frequency - радіочастота;

VHF - very high frequency - дуже висока частота;

VSAT - very small antenna terminal - дуже мала антена терміналу;

ЗС - земні станції;

КА - космічні апарати;

МСЕ - Міжнародний Союз Електрозв'язку;

НГССЗ - негеостаціонарні супутникові системи зв'язку;

ССЗ - супутникові системи зв'язку;

ФСС - фіксовані супутникові служби;

ЦЗС - центральна земна станція.

ВСТУП

Супутник зв'язку – це орбітальний штучний супутник Землі, який приймає сигнал зв'язку від передавальної наземної станції, підсилює і, можливо, обробляє його, а потім передає назад на Землю для прийому однієї або декількома прийомними наземними станціями. Інформація для зв'язку не походить і не закінчується на самому супутнику. Супутник є активним ретранслятором, виконуваних функцій аналогічним релейним вишок, використовуваним в наземної мікрохвильового зв'язку.

Індустрія комерційного супутникового зв'язку зародилася в середині 1960-х, і менш ніж за 50 років вона перетворилася з альтернативної екзотичної технології в основну технологію передачі, яка широко поширена у всіх елементах глобальної телекомунікаційної інфраструктури. Сучасні супутники зв'язку пропонують широкі можливості в додатках, пов'язаних з даними, голосом і відео, з послугами, що надаються користувачам фіксованою, широкомовної, мобільного, персонального зв'язку і приватних мереж.

Супутниковий зв'язок тепер став загальновизнаним фактом повсякденного життя, про що свідчать антени або «тарілки», які засівають горизонти міст і сіл, або майже миттєве висвітлення глобальних новин, яке вважається само собою зрозумілим, особливо під час міжнародних криз.

Зв'язок за допомогою супутника пропонує низку функцій, які недоступні в альтернативних режимах передачі, таких як наземні мікрохвильові, кабельні або волоконні мережі. Деякі переваги супутникового зв'язку:

• Незалежні витрати на відстань. Вартість супутникової передачі в основному однакова, незалежно від відстані між передавальною та приймальною наземними станціями. Витрати на супутникову передачу, як правило, є більш стабільними, особливо для міжнародних або міжконтинентальних комунікацій на значні відстані.

• Фіксовані витрати на трансляцію. Вартість супутникової широкомовної передачі, тобто передачі від одного наземного терміналу передачі до ряду

приймаючих наземних терміналів, не залежить від кількості наземних терміналів, що приймають передачу.

• Висока ємність. Зв'язки супутникового зв'язку включають високі несучі частоти з великою шириною діапазону інформації. Пропускна здатність типових супутників зв'язку коливається від 10 до 100 Мбіт/с і може надавати послуги для декількох сотень відеоканалів або декількох десятків тисяч голосових або передавальних каналів.

• Низький рівень помилок. Помилки бітів на цифровому супутниковому каналі, як правило, випадкові, що дозволяє використовувати методи статистичного виявлення та корекції помилок. Частоту помилок в одній бітовій помилці в 10^{-6} біт або краще можна регулярно ефективно та надійно досягати за допомогою стандартного обладнання.

• Різноманітні мережі користувачів. Великі ділянки Землі видно із типового супутника зв'язку, що дозволяє супутнику зв'язувати багато користувачів одночасно. Супутники особливо корисні для доступу до віддалених районів або громад, не доступних іншим способом наземними засобами. Супутникові термінали можуть знаходитися на поверхні, в морі або в повітрі, а можуть бути стаціонарними або мобільними.

Мета роботи – розробити алгоритм маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності.

Об'єкт дослідження – процес функціонування супутникових систем зв'язку.

Предмет дослідження – методи збільшення пропускної здатності супутникових систем зв'язку.

Метод дослідження. Дослідження виконано на основі використання основних положень теорії інформації та передавання сигналів; методів теорії розповсюдження електромагнітних хвиль; методів маршрутизації; методів комп'ютерного моделювання; математичної статистики.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської роботи доповідалися на:

- III міжнародній науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУТ, 30 листопада 2022 р.;

- XV науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 9 грудня 2022 р.

Публікації. Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету телекомунікацій, – 2022, – №1".

1 ІНЖЕНЕРІЯ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Початковий етап супутникового зв'язку

Супутник зв'язку є критичним елементом в загальній телекомунікаційної інфраструктури, як показано на рис. 1.1, на якому затіненій областю виділено компонент супутника зв'язку, пов'язаний з передачею інформації. Електронна інформація у формі голосу, даних, відео, зображень і т.д. генерується в призначеній для користувача середовищі на поверхні землі або поблизу неї. Першим вузлом інформації часто є наземний інтерфейс, який потім направляє інформацію на супутниковий висхідний канал, який генерує радіохвилі RF (радіочастоти), які поширюються по повітряному каналу на орбітальний супутник (або супутники). Інформація, що несе радіохвилі, посилюється і, можливо, обробляється на супутнику, потім переформатується і передається назад на приймаючу наземну станцію через другу радіохвилю RF, що поширюється по повітряному каналу. Мобільні користувачі, позначені автомобілем і телефонами, які потрібно на рис., зазвичай обходять наземний інтерфейс тільки для прямого зв'язку з мобільного на мобільний.

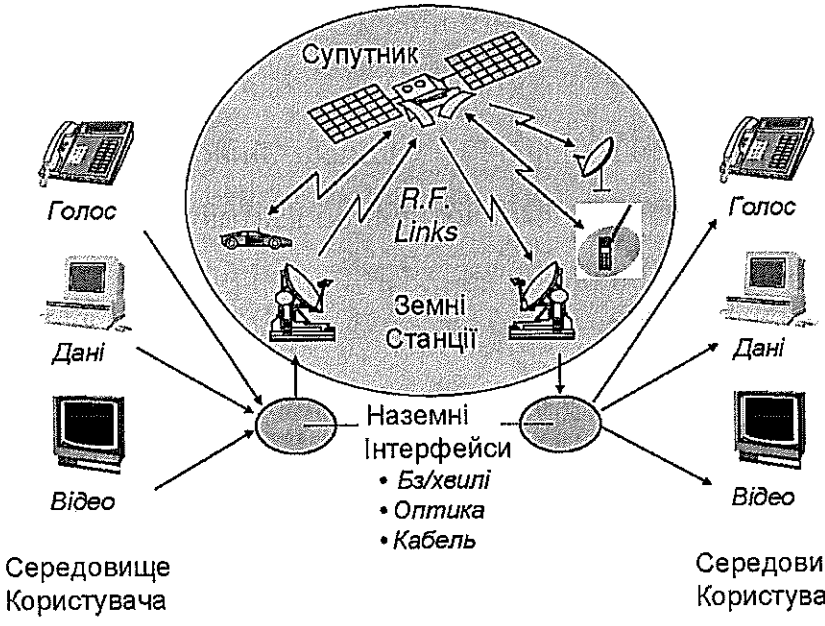


Рис. 1.1. Зв'язок за допомогою супутника в телекомунікаційній інфраструктурі

Успішне впровадження супутникового бездротового зв'язку вимагає надійних повітряних ліній зв'язку, що забезпечують висхідну та низхідну лінії зв'язку для сигналу зв'язку. Однак передача через атмосферу погіршує характеристики сигналу, і за деяких умов це може бути основною перешкодою для успішної роботи системи. Детальні знання про типи атмосферних впливів, що впливають на супутниковий зв'язок, та засоби їх прогнозування та моделювання для застосування до проектування та продуктивності каналів зв'язку мають важливе значення для інженерного проектування бездротових каналів зв'язку. Ефекти атмосфери є ще більш значними, оскільки поточні та заплановані супутники переміщуються на більш високі робочі частоти, включаючи діапазон Ku (14 ГГц висхідна лінія зв'язку / 12 ГГц низхідна лінія зв'язку), діапазон Ka (30 ГГц / 20 ГГц) та V діапазон (50 ГГц / 40 ГГц), де ефекти дощу, газоподібного ослаблення та інших ефектів посиляться.

Ідея синхронного орбітального супутника, здатного передавати комунікації на землю і з неї, як правило, приписується Артуру К. Кларку. Кларк зауважив у своїй класичній роботі 1945 р., що супутник на круговій екваторіальній орбіті радіусом близько 36 000 км буде мати кутову швидкість, що відповідає швидкості Землі, і, отже, він залишатиметься над тим самим місцем на земній поверхні. Таким чином, цей орбітальний штучний супутник міг приймати та передавати сигнали з будь-якої точки Землі з точки зору супутника в будь-яке інше місце на поверхні з точки зору супутника.

Технологія перевірки цієї концепції була доступна лише через десять років тому, коли в 1957 році колишній СРСР запустив СУПУТНИК І. Цей запуск започаткував «космічну еру», і Сполучені Штати і СРСР розпочали потужні космічні програми з розвитку технології та застосування в нових додатках [1]. Короткий огляд деяких з ранніх супутників зв'язку програм, а також їх основних досягнень, наступним чином.

SCORE

Перший зв'язок за допомогою штучного супутника був здійснений SCORE (Signal Communicating by Orbiting Relay Equipment), запущений ВВС, щоб

дозволити (160 на 1280 км) орбіту в грудні 1958 року. SCORE передавав записане голосове повідомлення із затримкою з одна земна станція до іншої. SCORE транслювати послання від президента Ейзенхауера станціям по всьому світу, даючи перший натяк впливу, що супутники будуть мати на точки до точки зв'язку. Максимальна тривалість повідомлення становила чотири хвилини, і реле працювало на висхідній лінії зв'язку 150 МГц і низхідній лінії зв'язку 108 МГц. SCORE, що живиться лише від батареї, працював 12 днів, перш ніж акумулятор вийшов з ладу, і пішов з орбіти через 22 дні.

ECHO

Першою з кількох спроб оцінити зв'язок за допомогою пасивних методів було розпочато із супутників ECHO 1 та 2, запущених Національним управлінням аеронавтики та космосу (NASA) у серпні 1960 р. та січні 1964 р. відповідно. Супутники ECHO являли собою великі орбітальні сфери з алюмінізованого лавсану, діаметром понад 30 м, які служили пасивними відбивачами для сигналів, що передаються від станцій на землі. Вони зацікавили публіку, оскільки їх було видно з землі неозброєним оком за належних умов освітлення, як правило, саме тоді, коли сонце сходило або заходило. Супутники ECHO працювали на частотах від 162 до 2390 МГц і вимагали великих наземних термінальних антен, як правило, 18 м і більше, з потужністю передачі 10 кВт. ECHO 1 залишався на орбіті майже 8 років, а ECHO 2 понад 5 років.

COURIER

Запущений у жовтні 1960 року, COURIER розширив технологію відкладеного ретранслятора SCORE і дослідив можливості зберігання та пересилання та реального часу від супутника з низькою орбітою. COURIER працював з частотою висхідної лінії зв'язку від 1,8 до 1,9 ГГц та низхідною лінією від 1,7 до 1,8 ГГц. Це було все твердий стан за винятком 2watt силових трубок вихідних, і був перший штучний супутник використовувати сонячні батареї для живлення. Супутник успішно працював протягом 17 днів, поки відмова командної системи не закінчив операції.

WESTFORD

WESTFORD була другою технологією, що застосовується для оцінки реле зв'язку за пасивними методами, перший успішний запуск армії США відбувся у травні 1963 року. WESTFORD складався з крихітних резонансних мідних диполів, розпорошених в орбітальному поясі, з комунікаціями, здійсненими відбиттям від дисперсних дипольних відбивачів.. Диполі мали розмір до половини довжини хвилі частоти реле, 8350 МГц. Голосові та частотно-маніпуляційні передачі (FSK) до 20 кбіт / с були успішно передані від наземної станції в Каліфорнії до станції в Массачусетсі. Однак, коли ремінь розігнався, пропускна здатність каналу знизилася до рівня нижче 100 біт / с. Швидкий розвиток активних супутників знизив інтерес до пасивного зв'язку, і ECHO та WESTFORD поклали край експериментам з пасивної технології [2].

TELSTAR

TELSTAR Супутники 1 і 2, запущені в низькі орбіти NASA для AT & T / Bell Telephone Laboratories в липні 1962 року і травні 1963 року народження, відповідно, були першими активними широкої смуга супутників зв'язку. TELSTAR передавав аналогові FM-сигнали з шириною смуги 50 МГц і працював на частотах 6,4 ГГц на висхідній лінії зв'язку та 4,2 ГГц на низхідній лінії зв'язку. Ці частоти проклали шлях для 6/4 ГГц C діапазон роботи, яка в даний час забезпечує основну частину фіксованої супутникової служби (ФСС) по всьому світу. TELSTAR 1 забезпечував багатоканальну телефонну, телеграфну, факсимільну та телевізійну передачі на станції в США, Великобританії та Франції, поки командна підсистема не вийшла з ладу в листопаді 1962 року через випромінювання поясу Ван Аллена. TELSTAR 2, перероблений з радіаційно стійкими транзисторами і виведений на вищу орбіту для зменшення експозиції в поясах Ван Аллена, успішно експлуатувався протягом двох років.

RELAY

RELAY 1, розроблений RCA для NASA, був запущений в грудні 1962 року і діяв протягом 14 місяців. RELAY мав два резервні ретранслятори, кожен з каналами 25 МГц та два канали 2 МГц. Він працював з частотою висхідної лінії зв'язку 1725 МГц і 4160 МГц і мав вихідний підсилювач потужністю TWT

потужністю 10 Вт. Широка передача телефонії та мережевого телебачення була здійснена між США, Європою та Японією. RELAY 2 був запущений в січні 1964 року і знову працював протягом 14 місяців. Програми RELAY і TEL STAR продемонстрували, що надійний, рутинний зв'язок може бути здійснений за допомогою орбітальних супутників, і далі вказали, що супутникові системи можуть обмінюватися частотами з наземними системами без погіршення перешкод.

SYNCOM

У SYNCOM супутники, розроблена Hughes Aircraft Company для NASA GSFC, при умови, що перші повідомлення від синхронного супутника. SYNCOM 2 і 3 були виведені на орбіту відповідно в липні 1963 р. та липні 1964 р. (SYNCOM 1 зазнав невдачі при запуску). SYNCOM, із частотою висхідної лінії зв'язку 7,4 ГГц та частотою низхідної лінії 1,8 ГГц, використовував два канали 500 кГц для двох шляхів вузької смуги зв'язку, і один канал 5 МГц для односторонньої шириною смуги передачі. SYNCOM був першим випробувальним зразком для розробки принципів утримання станцій та орбітального управління для синхронних супутників. Це був перший супутник, який застосував відстеження дальності та швидкості. NASA провело голосові, телетайпові та факсимільні тести, включаючи широкі публічні демонстрації, щоб збільшити базу інтересу супутникового зв'язку. Міністерство оборони США також провело випробування з використанням SYNCOM 2 і 3, включаючи передачі з судновим терміналом. Випробування з авіаційними терміналами проводились також за допомогою команд та телеметричних каналів SYNCOM VHF.

EARLYBIRD

Першим комерційним операційним супутником синхронного зв'язку був EARLYBIRD, пізніше названий INTELSAT I, розроблений COMSAT для INTELSAT і запущений НАСА в квітні 1965 р. Підсистема зв'язку, дуже схожа на конструкцію SYNCOM 3, мала два транспондери по 25 МГц і працювала на С діапазон, з висхідними лініями на 6,3 ГГц та нижніми на 4,1 ГГц. Він містив 240 двосторонніх голосових каналів або одну двосторонню телевізійну схему.

Вихідна потужність TWT становила 6 Вт. Операції між США та Європою розпочалися 28 червня 1965 р., дату, яку багато хто визнає датою народження комерційного супутникового зв'язку. EARLYBIRD залишався на службі до серпня 1969 р., коли замінили його супутники пізнішого покоління INTELSAT III.

ATS1 (Технологія програм Супутник 1)

ATS1, перша з надзвичайно успішної серії супутників програми Technology, була запущена в грудні 1966 року і продемонструвала довгий список "перших" у супутниковому зв'язку. ATS1 включав електронно- розрядну антену з коефіцієнтом посилення 18 дБ та шириною променя 17°. Він працював в діапазоні С (висхідна лінія зв'язку 6,3 ГГц, низхідна лінія 4,1 ГГц) з двома ретрансляторами 25 МГц. ATS1 забезпечував перший зв'язок з множинним доступом з синхронної орбіти. ATS1 мав VHF-зв'язки (висхідна лінія зв'язку 149 МГц, низхідна лінія зв'язку 136 МГц) для оцінки зв'язку повітря - земля через супутник. ATS1 також містив камеру високої роздільної здатності, забезпечуючи перші фотографії повної Землі з орбіти. ATS1 продовжував успішну експлуатацію значно далі свого трирічного проектного терміну, забезпечуючи VHF-зв'язок з Тихоокеанським басейном до 1985 року, коли контроль над станцією був втрачений [3].

ATS3

ATS3, запущений в листопаді 1967 року, продовжив експериментальні операції в С і VHF діапазону з безліччю повідомлень доступу і методів контролю орбіти. ATS3 вперше дозволив операцію "перехресного ремінця" в діапазоні С та VHF; сигнал, прийнятий на VHF може бути переданий на землю в С діапазоні. ATS3 представив перші кольорові знімки з високою роздільною здатністю звичної для нас землі з "синього мармуру", видно з синхронної орбіти. ATS3, як і ATS1, значно перевищив свій проектний термін, забезпечуючи VHF-зв'язок до Тихого океану та континентальної частини Сполучених Штатів для програм державної служби протягом більше десяти років.

ATS5

ATS5 мав підсистему зв'язку діапазону С, подібну до своїх попередників, але не мав можливості VHF. Натомість у нього була підсистема L- діапазону

(висхідна лінія зв'язку 1650 МГц, низхідна лінія зв'язку 1550 МГц) для дослідження повітряно-наземного зв'язку для навігації та управління повітряним рухом. ATS5 також містив пакет експериментів міліметрових хвиль, який працював на частотах 31,65 ГГц (висхідна лінія зв'язку) та 15,3 ГГц (низхідна лінія зв'язку), призначений для надання даних про поширення впливу атмосфери на земний космічний зв'язок на цих частотах. ATS5 був розроблений для роботи як стабілізований із градієнтом гравітації супутник, на відміну від супутників ATS1 та 3, що стабілізовані раніше. Він був успішно виведений в серпні 1969 року на синхронну орбіту, але бум гравітаційної стабілізації не вдалося розгорнути через стан обертання супутника. ATS5 був переведений у стабілізований стан, що призвело до того, що супутникові антени підмітали землю раз на 860 мілісекунд [4]. Більшість комунікаційних експериментів, проведених з обмеженим успіхом, у цьому несподіваному «імпульсному» режимі роботи. Проте експеримент міліметрової хвилі 15,3 ГГц за низхідною лінією зміг добре функціонувати після модифікацій наземних приймачів терміналів, і великі дані про розповсюдження були накопичені в більш ніж десятку місць у США та Канаді.

ANIK A

ANIK A (спочатку називався ANIK I), запущений NASA в листопаді 1972 року для Telsat Canada, був першим вітчизняним супутником комерційного зв'язку. Два пізніше ANIK As були запущені в квітні 1973 р. і травні 1975 р. Супутники, побудовані компанією Hughes Aircraft Company, працювали в діапазоні C і мали 12 транспондерів, кожен шириною 36 МГц. Основними послугами, що надавались, були телевізійне розповсюдження, голосова інформація SCPC (один канал на оператора) та послуги передачі даних. Потужність передачі становила 5 Вт, причому один промінь покривав більшу частину Канади та північ США. Схема антени для ANIK A була оптимізована для Канади, проте було достатньо покриття півночі США, щоб забезпечити орендовану послугу операторами зв'язку США для внутрішніх операцій до наявності американських супутників. Серія ANIK A продовжувала

експлуатуватися до 1985 року, коли супутники ANIK D замінили їх.

ATS6

ATS6, друге покоління супутникової програми NASA Applications Technology, забезпечило значний прогрес у супутниковій технології зв'язку та в демонстраціях нових додатків. ATS6 складався з розгорнутої параболічної антени діаметром 9 м, модуля огляду землі, двох сонячних решіток, що шукають сонце, і підтримуючої конструкцій. Він був запущений у травні 1974 року і розміщений на 94° З довготи, де він пробув один рік. У липні 1975 року його перенесли на 35° східної довготи для навчальних телевізійних експериментів в Індію. Через рік його знову перемістили до 140° довготи і використовували для кількох експериментальних програм, поки він не був виведений з синхронної орбіти в 1979 році. ATS6 мав вісім експериментів зв'язку та розповсюдження, які охоплювали діапазон частот від 860 МГц до 30 ГГц. Підсистеми зв'язку на ATS6 включали чотири приймачі: 1650 МГц (діапазон L), 2253 МГц (діапазон S), 59256425 (діапазон C) і 13/18 ГГц (діапазон K). Частоти передавача були: 860 МГц (L смуга), 2063 МГц (S смуга), 39534153MHz (C смуга) і 20/30 ГГц (Ka смуга). ATS6 забезпечував перехресне обв'язування на проміжній частоті (IF) між будь-яким приймачем на будь-який передавач (за винятком приймача 13/18 ГГц, який працював лише з передавачем 4150 МГц), дозволяючи широкий діапазон режимів зв'язку. Основними експериментами були:

• Експеримент з визначення місцеположення та зв'язку літаків (PLACE), який складався з передачі голосу та цифрових даних і чотирьох тональних діапазонів для розташування літаків. Система дозволяла голосовий зв'язок із множинним доступом до 100 літаків, що працювали в каналах 10 кГц.

• Експеримент із супутниковим навчальним телебаченням (SITE), спільний експеримент між NASA та урядом Індії для демонстрації прямого мовлення супутникового телебачення для навчальних цілей. Супутникові сигнали на частоті 860 МГц отримували у понад 2000 селах, використовуючи прості параболічні антени 3 м.

• Телевізійна ретрансляція з використанням малих терміналів (TRUST), яка

оцінювала продуктивність обладнання та системи для супутникового телебачення 860 МГц, використовуючи ту ж загальну конфігурацію, що і САЙТ.

• Експеримент з охорони здоров'я (HEW), який забезпечував супутникове розповсюдження освітніх та медичних програм, насамперед, на Алясці, штатах Скелястих гір та Аппалачі. Були доступні два незалежних керованих пучка, які працювали через 9-метровий відбивач, з висхідною лінією в діапазоні С (5950 МГц) і низхідною лінією в діапазоні S (2750 і 2760 МГц).

• Експеримент з радіочастотними перешкодами (RFI), який контролював діапазон від 5925 до 6425 МГц за допомогою чутливого бортового приймача для вимірювання та відображення джерел радіочастотних перешкод у континентальній частині США (CONUS). Мінімальним виявленим джерелом EIRP було 10 дБВт, з роздільною здатністю частоти 10 кГц.

• Експеримент з розповсюдження хвилі НАСА, який був розроблений для надання інформації про характеристики зв'язку та розповсюдження атмосфери на частотах 20 і 30 ГГц (діапазон Ка). Були доступні два режими роботи: і) маяки низхідної лінії зв'язку на частотах 20 і 30 ГГц для вимірювання ослаблення дощу, поглинання атмосфери та інших ефектів; і іі) режим зв'язку з висхідною лінією С-діапазону (6 ГГц) та одночасними низхідними посиланнями на частотах 20, 30 та 4 ГГц для оцінки зв'язку міліметрових хвиль у ширині смуги 40 МГц. Широкі вимірювання були проведені в США та Європі, надаючи першу детальну інформацію про ефективність супутникового зв'язку діапазону Ка.

• Міліметровий хвильовий експеримент COMSAT, який складався з 39 висхідних ліній зв'язку, 15 на 13,19 ГГц і 24 на 17,79 ГГц, отриманих ATS6 і повторно переданих на землю в діапазоні С (4150 МГц). Близько року вимірювань накопичувалися за статистикою загасання дощу, спільних імовірнісних розподілів і необхідних полях дощу, для посилань, які працюють на К групи [5].

Досягнення ATS6 були широко задокументовані та надали широкий спектр цінної інформації про дизайн та характеристики практично для кожного додатка, реалізованого в сучасних системах супутникового зв'язку.

CTS

Супутник комунікаційних технологій (CTS) – це спільна програма між НАСА та канадським Департаментом зв'язку для оцінки супутникових технологій високої потужності, що застосовуються до програм супутникового мовлення (BSS) на діапазоні Ku. TWT на виході 12 ГГц, 200 Вт на CTS, наданий НАСА, дозволяв приймати телевізор і двосторонній голос з невеликими (діаметром 120 см) антенами наземного терміналу. Також був включений постійно працюючий маяк розповсюдження 11,7 ГГц, і довгострокова (36 місяців) статистика поширення була розроблена для кількох місць у Сполучених Штатах. CTS був запущений в січні 1976 року і проводив великі експериментальні випробування та демонстрації в США та Канаді до завершення операцій у листопаді 1979 року.

Три важливі події допомогли сформувати напрямок і швидкість розвитку супутникового зв'язку в перші роки:

• Ініціатива Організації Об'єднаних Націй 1961 р. Ця ініціатива стверджувала, що "зв'язок за допомогою супутника повинен бути доступний для країн світу якомога швидше...".

• Закон COMSAT 1962 р. Конгрес США створив міжнародну супутникову організацію зв'язку COMSAT. COMSAT був заснований в 1963 році і служив основним комерційним постачальником міжнародних послуг супутникового зв'язку в США.

• INTELSAT. У серпні 1964 року було створено INTELSAT, який став визнаною міжнародною юридичною особою з питань міжнародного супутникового зв'язку. COMSAT - єдина організація, яка проводить канали США до INTELSAT.

Ці ранні досягнення та події призвели до швидкого зростання індустрії супутникового зв'язку, починаючи з середини 60-х років. INTELSAT був першочерговим рушієм у цей період часу, зосередившись на першому впровадженні переваг супутникового зв'язку для багатьох країн світу.

Десятиліття 70-х років привело до появи вітчизняного супутникового зв'язку (тобто надання супутникових послуг у внутрішніх межах однієї країни), що зумовлено швидким зниженням вартості супутникового обладнання та послуг.

Технологія 1970-х рр. також дозволила вперше розглянути регіональний супутниковий зв'язок, в якому зони покриття антенами були охоплені кількома сусідніми країнами з подібними інтересами до зв'язку.

У 1980-х роках почалося швидке впровадження нових супутникових послуг та нових учасників супутникового зв'язку. Близько 100 країн були задіяні в супутниковому зв'язку, надаючи або супутникові системи, або супутникові послуги. У цьому десятилітті також з'явилися нові та інноваційні способи оплати високих витрат на супутникові системи та послуги, включаючи опції оренди / купівлі, приватні мережі (які часто називають дуже маленькими антенними терміналами або VSAT) та приватні послуги запуску.

90-ті роки запровадили послуги мобільного та персонального зв'язку через супутник. У цю еру також відбувся перехід до більш високих частот, щоб підтримати зростаючі вимоги до швидкості передачі даних в середині насичення ширини смуги в нижній виділеній смузі частот s. Також були введені "розумні супутники", що забезпечують бортову обробку та інші передові технології самого супутника, перетворюючи супутник із простого ретранслятора даних на головний центр обробки комунікацій на небі.

У новому тисячолітті відбулося швидке впровадження нових послуг, включаючи пряме домашнє відео- та аудіомовлення та стільниковий мобільний супутниковий зв'язок. Найкраща орбіта для супутників зв'язку, геосинхронна (GSO) орбіта, тепер ділиться увагою з низькоорбітальними мережами GSO (NGSO), особливо для глобального стільникового мобільного зв'язку.

З моменту свого створення індустрія супутникового зв'язку характеризується бурхливим розширенням на нові ринки та додатки, які використовують переваги супутникового зв'язку та забезпечують економічно вигідні альтернативи традиційним режимам передачі телекомунікацій [6].

1.2 Деякі основні визначення супутникової системи зв'язку

У цьому підрозділі подано деякі основні визначення та параметри, що використовуються у галузі супутникового зв'язку, які будуть використані у всій книзі при оцінці та аналізі проектування та роботи систем супутникового зв'язку. Відповідні розділи, які більш повно обговорюють параметри, також вказуються там, де це доречно.

Сегменти супутникового зв'язку

Ми починаємо з частини супутникового зв'язку інфраструктури зв'язку, зображеної затіненим овалом на рис. 1.1. Частина супутникового зв'язку розбита на дві області або сегменти: космічний сегмент і сегмент Землі (або Землі).

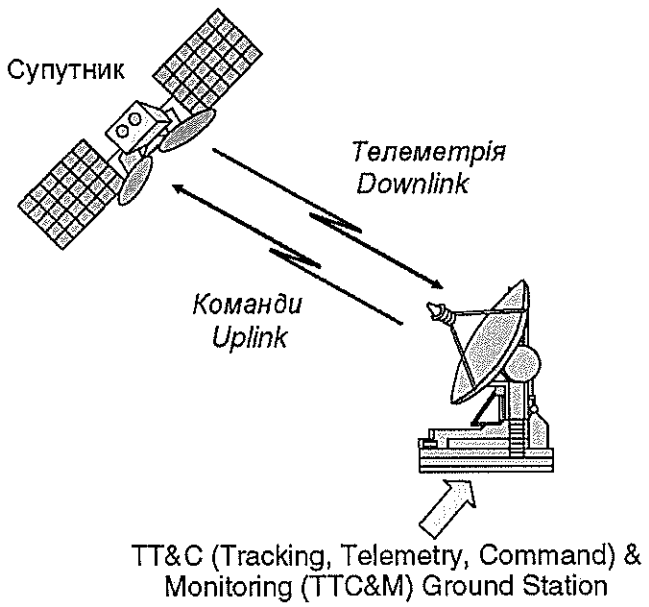


Рис. 1.2. Космічний сегмент для супутникової мережі

Елементи космічного сегмента супутникової системи зв'язку показані на рис. 1.2. Космічний сегмент включає супутник (або супутники) на орбіті в системі та наземну станцію, що забезпечує оперативний контроль супутників на орбіті. Наземна станція по-різному називається станцією відстеження, телеметрії, управління (TT&C) або станцією відстеження, телеметрії, управління та моніторингу (TTC & M). Станція TTC & M забезпечує необхідні функції

управління та управління космічними апаратами, щоб супутник працював безпечно на орбіті. У TTC & M зв'язку між космічним апаратом і землею, як правило, відокремлені від призначених для користувача посилань зв'язку. TTC & M посилання можуть працювати на ту ж частоту смугу з або в інших смугах с. TTC & M найчастіше досягається за допомогою окремого наземного терміналу, спеціально розробленого для складних операцій, необхідних для утримання космічного корабля на орбіті.

Наземний сегмент супутникової системи зв'язку складається з терміналів, заснованих на площі земної поверхні, які використовують комунікаційні можливості космічного сегмента. Наземні станції TTC & M не включені в наземний сегмент. Клеми наземного сегмента складаються з трьох основних типів:

- нерухомі (на місці) термінали;
- переносні термінали;
- мобільні термінали.

Стаціонарні термінали призначені для доступу до супутника, закріпившись на місці. Вони можуть надавати різні типи послуг, але вони визначаються тим, що вони не рухаються під час спілкування із супутником. Прикладами стаціонарних терміналів є невеликі термінали, що використовуються в приватних мережах (VSAT), або термінали, встановлені на будинках, що використовуються для прийому супутникових сигналів.

Переносні термінали спроектовані для переміщення, але, перебуваючи на місці, залишаються нерухомими під час передач на супутник. Прикладами переносного терміналу є вантажівки для збору супутникових новин (SGN), які рухаються в місця розташування, зупиняються на місці, а потім розгортають антену для встановлення зв'язків із супутником.

Мобільні термінали призначені для зв'язку з супутником під час руху. Далі вони визначаються як сухопутні, аеронавігаційні або морські мобільні, залежно від їх розташування на поверхні землі або поблизу неї.

Параметри супутникового зв'язку

Супутниковий зв'язок зв'язку визначається кількома основними параметрами, деякі використовуються у традиційних визначеннях системи зв'язку, інші унікальні для супутникового середовища. Рис. 1.3 узагальнює параметри, що використовуються при оцінці ліній супутникового зв'язку. Показані два односторонні вільні космічні або повітряні сполучення між земними станціями A і B. Частина зв'язку від наземної станції до супутника називається висхідною лінією, тоді як частина від супутника до землі є низхідною. Слід звернути увагу, що будь-яка станція має висхідну та низхідну лінії зв'язку. Електроніка в супутнику, яка приймає сигнал висхідної лінії зв'язку, посилює і, можливо, обробляє сигнал, а потім переформатує і передає сигнал назад на землю, називається транспондером, позначеним символом трикутного підсилювача на рис. (точка трикутника вказує напрямок передачі сигналу). Два ретранслятори потрібні супутника для кожного два шляхи зв'язку між двома наземними станціями, як показано на рис. Антени на супутнику, які приймають і передають сигнали, зазвичай не входять до складу електроніки транспондерів, вони визначаються як окремий елемент корисного навантаження супутника.

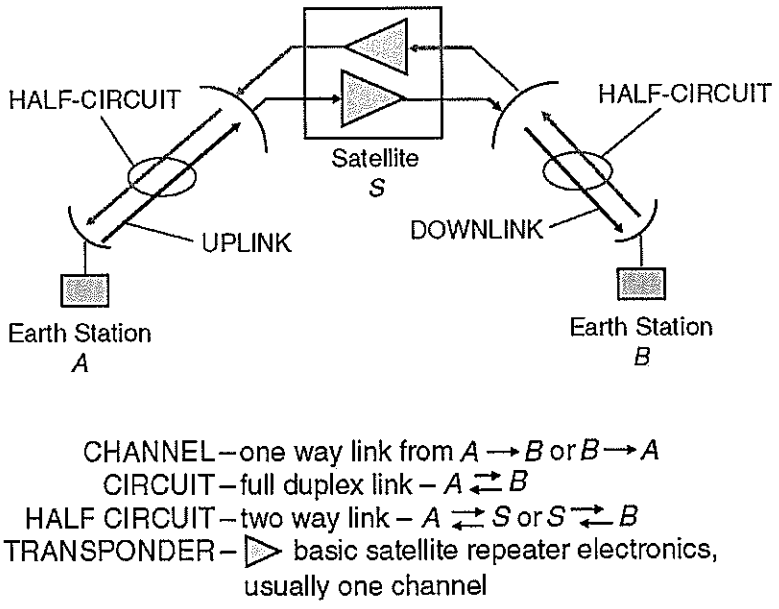


Рис. 1.3. Основні параметри зв'язку в супутниковій лінії зв'язку

Канал визначається як один шлях загальної лінії зв'язку від A до S до B, або зв'язок від B до S до A. Дуплекс (два способи) пов'язує A до S до B і B до S до A встановити ланцюг між двома станціями. Позначення ланцюгів є переходом від стандартних визначень телефонії, які застосовуються до супутникового сегмента інфраструктури зв'язку [7].

Супутникові орбіти

Вводяться тут умови супутникової орбіти для чотирьох найбільш часто використовуваних орбіт у супутниковому зв'язку, показані на рис. 1.4. Основна висота (-и) орбіти та час затримки в один бік відображаються для кожної орбіти, разом із загальними позначеннями скорочень.

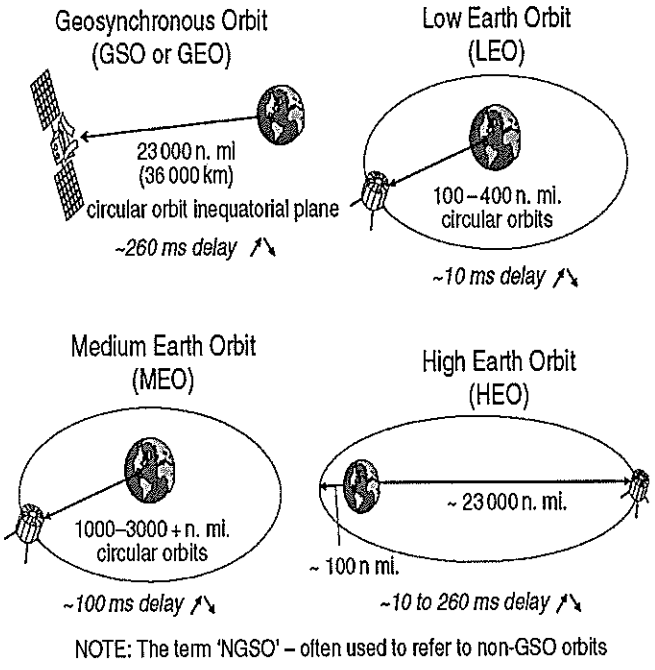


Рис. 1.4. Супутникові орбіти

Геосинхронна орбіта (GSO або GEO)

GSO орбіта є найбільш популярною орбітою і використовується для супутників зв'язку. GSO супутник знаходиться на круговій орбіті в екваторіальній площині, при номінальному відстані 36000 км в точці стабільної, яка підтримує супутник на фіксованому місці в небі. Це надзвичайна перевага для супутникового зв'язку, оскільки напрямок наведення залишається фіксованим у

просторі, а наземній антені не потрібно відстежувати рухомий супутник. Недоліком GSO є тривалий час затримки ~ 260 мс, який може вплинути на мережеву синхронізацію або вплинути на голосовий зв'язок.

Низька орбіта Землі (LEO)

Другою за поширеністю орбітою є низька навколоземна орбіта (LEO), яка є круговою орбітою, що номінально знаходиться на від 160 до 640 км над землею. Затримка невелика, ~ 10 мс, проте супутник рухається по небу, і наземна станція повинна активно відстежувати супутник, щоб підтримувати зв'язок.

Середня орбіта Землі (MEO)

MEO схожий на MEO, однак супутник знаходиться в більш високій круговій орбіті 1600 до 4200 км. Це популярна орбіта для навігаційних супутників, таких як сузір'я GPS.

Висока орбіта Землі (HEO)

HEO – це єдина нециркулярна орбіта чотирьох типів. Він працює з еліптичною орбітою, з максимальною висотою (апогей), подібною до GSO, і мінімальною висотою (перигей), подібною до LEO.

Орбіти супутників, які не є синхронними, такі як LEO, MEO або HEO, часто називають не супутниками геосинхронної орбіти (NGSO).

Позначення смуги частот. Частота роботи є, мабуть, головним визначальним фактором у проектуванні та роботі каналу супутникового зв'язку. Довжина хвилі сигналу шляху вільного простору є основним параметром, який визначає ефекти взаємодії атмосфери та наслідки деградації шляху зв'язку. Крім того, розробник супутникових систем повинен працювати в рамках обмежень міжнародних та вітчизняних нормативних актів, що стосуються вибору робочої частоти вільного простору.

Два різних способу позначення прийшли в ужиток, щоб визначити радіочастотний діапазон S. Позначення діапазонів літер, отримані з використанням радарів у 1940-х роках, ділять спектр від 1 до 300 ГГц на вісім діапазонів з номінальними діапазонами частот, як показано на рис. 1.5. До групи додатково розбита на KU діапазон (Klower) і KA групи (Kabove).

Межі діапазону s не завжди дотримуються, і часто спостерігається деяке перекриття. Наприклад, деякі посилання розглядають діапазон C як 3,76,5 ГГц, а діапазон Ku як 10,912,5 ГГц. Смуга S вище 40 ГГц бачив кілька літерних позначень, використовуваних, в тому числі Q смуги, W групи, U групи і W групи. Неоднозначність позначень діапазонів літер говорить про те, що їх слід використовувати з обережністю, особливо коли конкретна частота є важливим фактором.

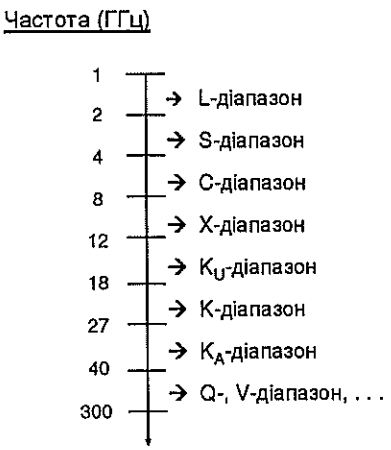


Рис. 1.5. Позначення частотних смуг

Друге позначення ділить спектр від 3 Гц до 300 ГГц на діапазони на основі декадних кроків номінальної довжини хвилі, як показано на рис. 1.6. Це позначення є менш двозначним, ніж буквене позначення, однак, як ми побачимо в наступних розділах, більшість ліній супутникового зв'язку працюють лише в межах трьох-чотирьох діапазонів S, VHF через EHF, причому переважна більшість систем в діапазоні SHF.

Як правило, позначення смуги частот корисні, коли загальні характеристики систем супутникового зв'язку представляють інтерес. Коли частота певного операційних носія або певна частота смуга має важливе значення, проте, краще рішення буде вказувати на частоту безпосередньо, а не з використанням частоти діапазону позначень [8].

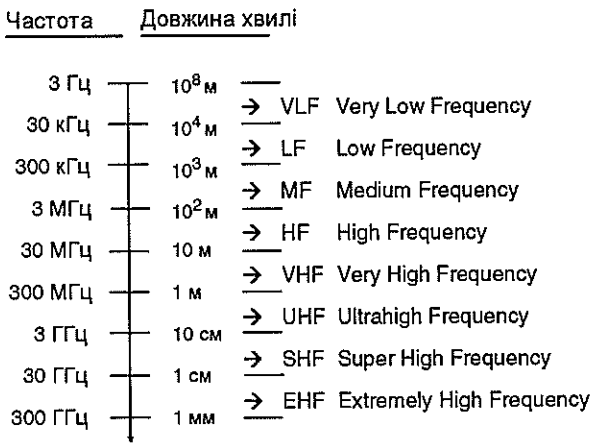


Рис. 1.6. Позначення смуги частот за довжиною хвилі

1.3 Процес регулювання супутникового зв'язку

Супутникові оператори та власники повинні працювати в рамках обмежень, що стосуються основних параметрів та характеристик системи супутникового зв'язку. Параметри системи супутникового зв'язку, які підпадають під регуляторну парасольку, включають:

- вибір частоти випромінювання;
- максимально допустима потужність випромінювання;
- розташування орбіт (слотів) для GSO.

Метою регулювання є мінімізація радіочастотних перешкод і, меншою мірою, фізичних перешкод між системами. Потенційні радіоперешкоди включають не тільки інші діючі супутникові системи, але також наземні системи зв'язку та інші системи, що випромінюють енергію в тій самій смузі частот.

Дисципліна, пов'язана з розробкою технічних, аналітичних та інституційних елементів, що підтримують розподіл та регулювання частотного спектру, зазвичай називають управлінням спектром або управлінням частотами. У більшості країн є активні організації, як в урядовому, так і в комерційному секторах, які займаються управлінням спектром, особливо ті, що відповідають за розвиток супутникових систем або надання супутникових послуг.

У процесі залучено два рівні регулювання та розподілу: міжнародний та

внутрішній. Основною організацією, відповідальною за регулювання та розподіл міжнародних систем супутникового зв'язку, є Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ) зі штаб-квартирою в Женеві, Швейцарія.

МСЕ був утворений в 1932 році з Міжнародного телеграфного союзу, створеного в 1865. Це спеціалізована установа Організації Об'єднаних Націй, в даний час з більш ніж 190 членів. Структура МСЕ подібна до Організації Об'єднаних Націй: Генеральний секретаріат, обрана Адміністративна рада, ради та комітети для виконання технічних та адміністративних функцій. МСЕ має три основні функції:

- розподіл та використання радіочастотного спектру;
- стандартизація телекомунікацій;
- розвиток та розширення телекомунікацій у всьому світі.

Три функції виконуються через три сектори в рамках організації МСЕ: Сектор радіозв'язку (МСЕ-R), відповідальний за розподіл частот та використання радіочастотного спектру; сектор стандартів телекомунікацій (ITU-T), відповідальний за стандарти зв'язку; та Сектор розвитку телекомунікацій (ITU-D), відповідальний за розвиток та розширення світового телекомунікаційного зв'язку.

Міжнародні правила, розроблені МСЕ, приймаються та обробляються кожною країною, де розробляються нормативні акти на внутрішньому рівні. МСЕ не мають правозастосовних повноважень кожна країна залишається керувати і стежити за дотриманням правил в межах його кордонів.

Відповідальність за управління нормативними актами в США покладається на Федеральну комісію зв'язку (FCC) та Національне агентство зв'язку та інформації (NTIA). Супутникові системи, що експлуатуються федеральним урядом, працюють через NTIA, тоді як усі інші системи, включаючи комерційні та місцеві урядові системи, працюють через FCC. Державний департамент США координує всю діяльність з управління частотою та спектром та представляє США в МСЕ та пов'язаних з ним організаціях. В інших країнах існують власні механізми та організації, відповідальні за функцію управління спектром, як правило, державні установи або бюро, які працюють у тісній співпраці з

супутниковими системами та постачальниками послуг.

Два атрибути визначають специфічну частоту смуги та інші регуляторні чинники, з для конкретної супутникової системи:

• послуги (послуги), що надаються супутниковою системою / мережею; і

• розташування (місця) супутникової системи / наземних терміналів.

Обидва атрибути разом визначають смугу частот або діапазон s, де може працювати супутникова система.

На рис. 1.7 перелічено основні послуги, визначені МСЕ, що стосуються супутникових систем. Деякі зони обслуговування поділяються на декілька підзон. Наприклад, зона мобільної супутникової служби (MSS) додатково розбивається на аеронавігаційну мобільну супутникову службу (AMSS), наземну мобільну супутникову службу (LMSS) та морську мобільну супутникову службу (MMSS), залежно від місцевості наземних терміналів. Якщо клеми будуть розташовані на висоті більше одного місця, наприклад, на суші і на морі, то MSS буде застосовуватися.

- Аеронавігаційний мобільний супутник
- Аеронавігаційний/радіонавігаційний супутник
- Аматорський супутник
- Супутник мовлення
- Супутник дослідження Землі
- Фіксований супутник
- Міжсупутниковий зв'язок
- Сухопутний мобільний супутник
- Морський мобільний супутник
- Морський радіонавігаційний супутник
- Метеорологічний супутник
- Мобільний супутник
- Радіонавігаційний супутник
- Космічні операції
- Космічні дослідження
- Стандартний супутник частоти

Рис. 1.7. Супутникові служби, визначені МСЕ

Другий атрибут, розташування заземлюючих клем, визначається відповідною зоною обслуговування. МСЕ ділить земну кулю на три області телекомунікаційних послуг, як показано на рис. 1.8. Три регіони ділять земельні ділянки приблизно на основні масиви Європи та Африки (Регіон 1), Америки

(Регіон 2) та Тихоокеанські країни (Регіон 3). Кожен регіон обслуговування розглядається як незалежний з точки зору розподілу частот, оскільки загальне припущення полягає в тому, що системи, що працюють в одному з регіонів, захищені географічним відділенням від систем в інших регіонах обслуговування. Міжнародні розподіли частот передбачені для систем, що працюють на глобальній основі [9].

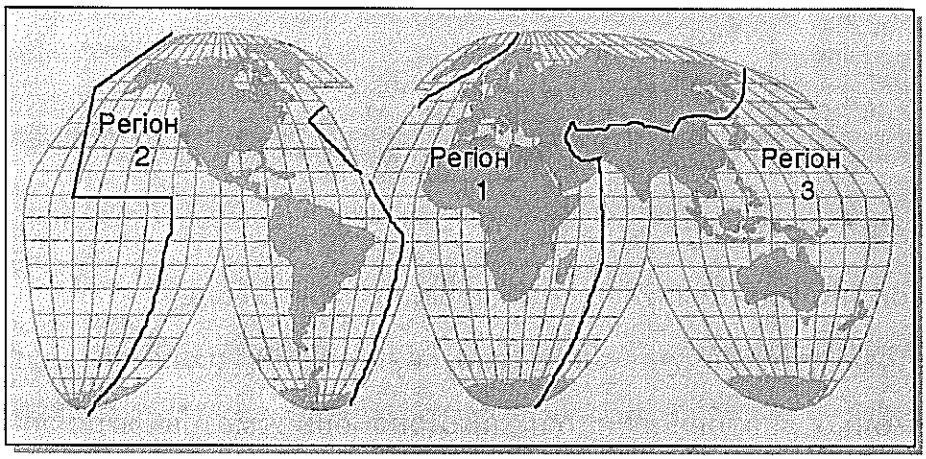


Рис. 1.8. Регіони телекомунікаційних послуг МСЕ

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

2.1 Постановка завдання дослідження

Значне місце в супутниковому зв'язку займають негеостаціонарні супутникові системи зв'язку (НГССЗ) з міжсупутниковими лініями зв'язку (рис. 2.1). У НГССЗ зазвичай входять системи на кругових низьких і середніх орбітах. Системи на еліптичних орбітах зазвичай не входять в НГССЗ. На рисунку 2.1 показана низькоорбітальна НГССЗ з міжсупутниковими лініями зв'язку, що складається з 66 космічних апаратів (КА) на полярних орбітах. Передача даних ведеться по шляху «термінал-відправник — КА термінала-відправника — ланцюжок КА між КА терміналу-відправника та КА термінала-одержувача — КА терміналу-одержувача — термінал-одержувач» (на рис. 2.1 шлях відмічений червоним кольором).

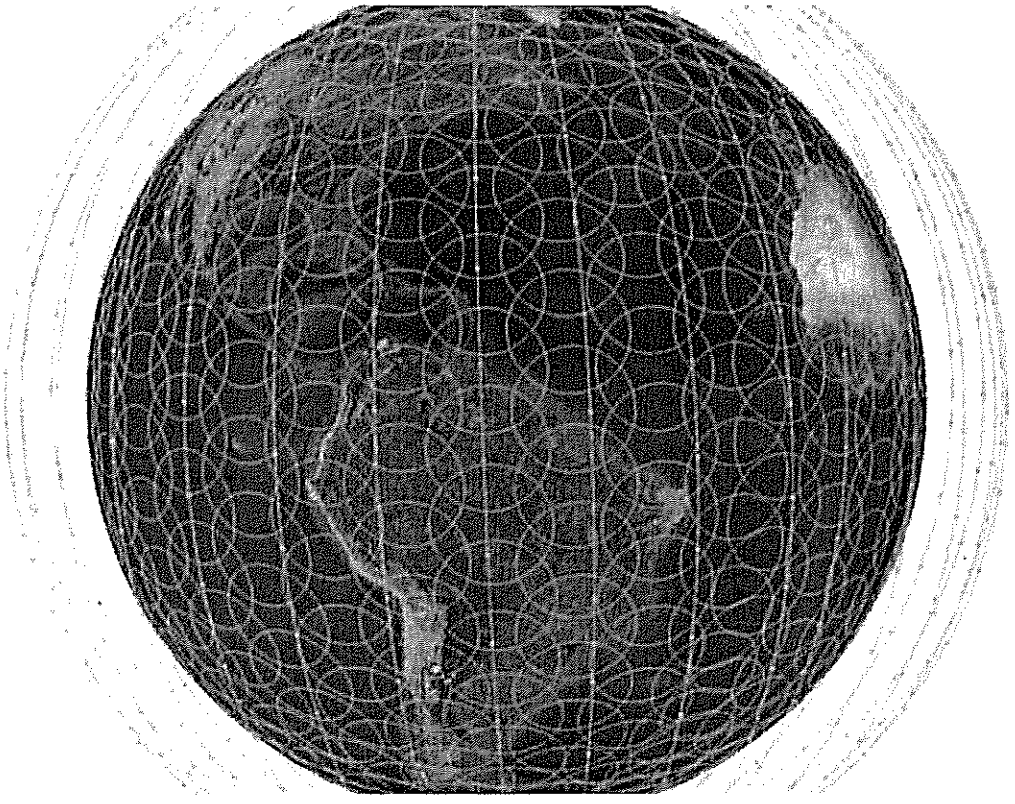


Рис. 2.1. Передача даних в НГССЗ з міжсупутниковими лініями

Завдяки низькій орбіті у НГССЗ в порівнянні з іншими супутниковими системами зв'язку (ССЗ) менший час затримки сигналу, а також потрібна менша потужність сигналу. Тому НГССЗ найкраще серед інших супутникових систем підходять для передачі даних додатків реального часу і мультимедіа.

Через малу висоту орбіти виникають наступні недоліки.

Область покриття одного КА дуже мала в порівнянні з геостаціонарним або високоеліптичним КА, тому для глобального покриття потрібна велика кількість КА.

Середній час видимості КА через високу орбітальну швидкість дуже малий. На низькій орбіті час видимості може становити кілька хвилин. Тому потрібні складні протоколи хендовера.

Третій недолік є наслідком першого. Якщо абоненти знаходяться в покритті одного КА, то КА безпосередньо забезпечує зв'язок між цими двома абонентами, як у випадку геостаціонарного КА. У разі, якщо абоненти перебувають в області покриття різних КА (що в НГССЗ через малу область покриття КА відбувається часто), то вимагається передати дані від одного КА іншому.

Проблема передачі даних від одного КА іншому може бути вирішена двома основними способами.

Перший спосіб - розстановка земних станцій (ЗС) таким чином, щоб кожен КА був пов'язаний принаймні з одною ЗС. Але ЗС вкрай складно розставити по всій поверхні Землі. Тому існує другий спосіб.

Другий спосіб - зв'язати КА міжсупутниковими лініями в повнозв'язну супутникову мережу (якщо не враховувати зв'язку з абонентськими терміналами, що знаходяться за межами радіовидимості), щоб кожен КА ССЗ міг зв'язатися з іншим будь-яким КА ССЗ через інші КА, не звертаючись до ЗС. З появою супутникової мережі виникає проблема маршрутизації.

Існує два основних типи алгоритмів маршрутизації в ССЗ: QoS маршрутизація і маршрутизація з балансуванням навантаження. QoS маршрутизація – це пошук шляху до заданих вимог для кожної пари одержувач - відправник окремо; метою QoS маршрутизації не є збільшення продуктивності

ССЗ в цілому. Маршрутизація з балансуванням навантаження – це знаходження безлічі маршрутів для кожної пари відправник-одержувач і вибір з набору маршрутів безлічі шляхів з подальшим розподілом потоку даних по ним з метою збільшення параметра або параметрів продуктивності ССЗ в цілому. У більшості випадків параметр продуктивності ССЗ – це пропускна здатність.

Аналіз літератури показав, що більшість робіт присвячено QoS маршрутизації. Завдання маршрутизації з балансуванням навантаження вивчена значно менше. Наприклад, робота [4] присвячена завданню балансування навантаження між повітряним і космічним сегментом об'єднаної на основі Mesh-технології повітряно-космічної мережі зв'язку. Однак в цій роботі не розглядається задача балансування навантаження безпосередньо всередині супутникового сегмента.

Завдання маршрутизації з балансуванням навантаження важлива (у порівнянні з QoS маршрутизацією), так як рішення цієї задачі направлено безпосередньо на максимізацію пропускної здатності всієї супутникової системи, а не на задоволення вимог кожного потоку окремо. Пропускна здатність НГССЗ дуже мала в порівнянні з наземними системами зв'язку і дорога. Тому з цієї точки зору маршрутизація з балансуванням навантаження важливіше QoS маршрутизації. Однак зазначимо, що алгоритми QoS маршрутизації можуть побічно забезпечувати балансування навантаження.

Виходячи з вищесказаного, маршрутизація з балансуванням навантаження в НГССЗ є актуальним завданням. Тому в даній роботі запропоновано алгоритм централізованої багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в НГССЗ.

Маршрутизація з балансуванням навантаження здійснюється шляхом розрахунку пропорцій розподілу потоків даних за розділами маршрутів між кожною парою КА. Розрахунок проводиться один раз в період балансування навантаження T (визначення T буде дано нижче по тексту).

Послідовність дій алгоритму маршрутизації з балансуванням навантаження за один період балансування навантаження наступна.

Кожен КА системи є джерелом потоків даних для інших КА (дані надходять від абонентських терміналів в області покриття КА) і одержувачем потоків даних від інших КА (дані надходять до абонентських терміналів в області покриття КА). Потоки даних від абонентських терміналів об'єднуються в один загальний потік, якщо у цих потоків однаковий КА-відправник і КА-одержувач. Кожен КА вимірює обсяг загального потоку, джерелом якого є, за період балансування навантаження T. Значення T має бути відносно невеликим, щоб в наступному періоді балансування навантаження обсяг потоків даних не дуже відрізнявся від попереднього періоду [10].

В кінці періоду балансування навантаження кожен КА відправляє виміряні обсяги потоків даних на центральну земну станцію (ЦЗС).

Для кожної топології в наступному періоді балансування навантаження ЦЗС:

Визначає пропорції розподілу потоків даних по заздалегідь розрахованим маршрутами. Маршрути можуть бути розраховані заздалегідь, тому як топологія супутникової системи передбачувана.

ЦЗС з наборів маршрутів і пропорцій розподілу складає таблиці маршрутизації для кожного КА.

ЦЗС відправляє КА таблиці маршрутизації на наступний період балансування навантаження.

На третьому кроці вирішується безпосередньо сама задача балансування навантаження.

Балансування навантаження є завданням оптимізації. Завдання полягає в наступному.

Дано:

Даний граф супутникової системи G, S, L, C, V, де S – множина КА, L – множина ліній, C – множина швидкостей передачі для кожної лінії, V – множина об'ємів вихідного буфера для кожної лінії.

Дана множина об'ємів потоків даних в супутниковій системі $F \quad f_{ij} \ ,i,j \quad S$, де S – множина КА НССЗ, f_{ij} – об'єм потоку даних від КА i до КА j за

попередній час T, названий періодом балансування навантаження.

Дані набори маршрутів між кожною парою КА в супутниковій системі M m_{ij} .

Дано значення періоду балансування навантаження T.

Необхідно: знайти такі пропорції розподілу R r_{ij} потоків даних F за маршрутами M, мінімізується ймовірність втрати пакетів P через переповнення буферів ліній.

Іншими словами, потрібно мінімізувати цільову функцію U, що визначає P, за змінною R при заданих змінних G, M, F : $min\ P\ \ U\ G, M, F, R$.

Це завдання оптимізації вирішується евристичним алгоритмом оптимізації. Для евристичних алгоритмів оптимізації потрібно функція оцінки рішення і функція випадкового створення і зміни рішень.

Також для вирішення завдання балансування навантаження необхідні набори маршрутів M.

Тому розглянемо функції для алгоритму евристичної оптимізації та алгоритм пошуку маршрутів M.

Функції оцінки рішення, формування початкового рішення і його стохастичної модифікації для евристичного алгоритму оптимізації.

Відзначимо, що функція в даному випадку не є функцією в математичному сенсі, а є алгоритмом, тому що в теорії оптимізації зазвичай використовується термін функція незалежно від того, чи є функція функцією, а не алгоритмом.

Розглянемо функцію випадкового формування та подальшої стохастичною модифікації рішення. Потрібно поставити випадкові пропорції розподілу r_{ij} потоку даних f_{ij}по набору маршрутів m_{ij} для всіх пар КА ij.

Розрахунок пропорцій розподілу для одного набору маршрутів базується на випадковому завданні початкових пропорцій як залежного, так і не залежного від довжин маршрутів.

Розглянемо спочатку спосіб випадкового завдання пропорцій, що залежить від довжин маршрутів. Від довжини маршрутів вибір пропорцій розподілу

залежить наступним чином. Використовується припущення, що чим коротше маршрут, тим менше ліній завантажує потік даних, що йде по ньому, значить інші потоки можуть використовувати вільну ємність ліній. Тому пропорції розподілу потоку даних повинні бути такими, щоб чим коротше маршрут, тим більша частка потоку даних прямувала по цьому маршруту. Для того, щоб створити пропорції розподілу подібним чином, зручно скористатися експоненційною функцією $y = e^{\lambda x}$ Послідовність визначення пропорцій розподілу потоку даних по N маршрутами на основі експоненційної функції наступна.

Задамося мінімальним і максимальним значенням $x_{\min} = 1$ і $x_{\max} = 2N$, де N – кількість маршрутів в наборі маршрутів.

Виберемо з рівномірним розподілом випадкове значення в діапазоні 0,1.

Рівномірно продискретизуємо на відрізку $[x_{min}, x_{max}]$ графік експоненціальної функції $y=e^{\lambda x}$ з обраним на попередньому кроці значенням λ таким чином, щоб отримати $N+1$ значень y і щоб були отримані значення функції в $x_{\min}$ та x_{max}.

Проведемо нормування значень y за формулою $y \; ymin \; / \; ymax \; ymin$.

На основі множини чисел y отримуємо множину чисел r $y2$ $y1$, $y3$ $y2$, $y4$ $y3$,..., yN 1 yN. Множина r складається з N експоненціально зростаючих чисел більше 0, сума яких дорівнює 1. Ці числа використовуємо в якості пропорцій розподілу потоку даних по N маршрутами. Маршрути упорядковано відповідно до зменшенням довжини. Перше найменше значення з r відповідає довжині маршруту, останнє найбільше - найкоротшому маршруту.

Випадково змінюючи параметр λ, можна випадково отримувати розподіл потоку даних за маршрутами від рівномірного (λ = 0) до такого, де практично весь обсяг потоків даних належить найкоротшому маршруту. На рис. 2.2 зображені пропорції розподілу для 8 маршрутів з різними значеннями λ.

Проте, за допомогою вищеописаного способу (методу з експоненціальним розподілом по маршрутам) майже неможливо отримати рівномірний розподіл потоку по маршрутам і неможливо отримати розподіл з напрямком потоку даних тільки по найкоротшому шляху.

Щоб досягти направлення потоку тільки по найкоротшому шляху і рівномірного його розподілу за маршрутами, з невеликою ймовірністю будемо вибирати рівномірний розподіл по маршрутам і розподіл по найкоротшому шляху.

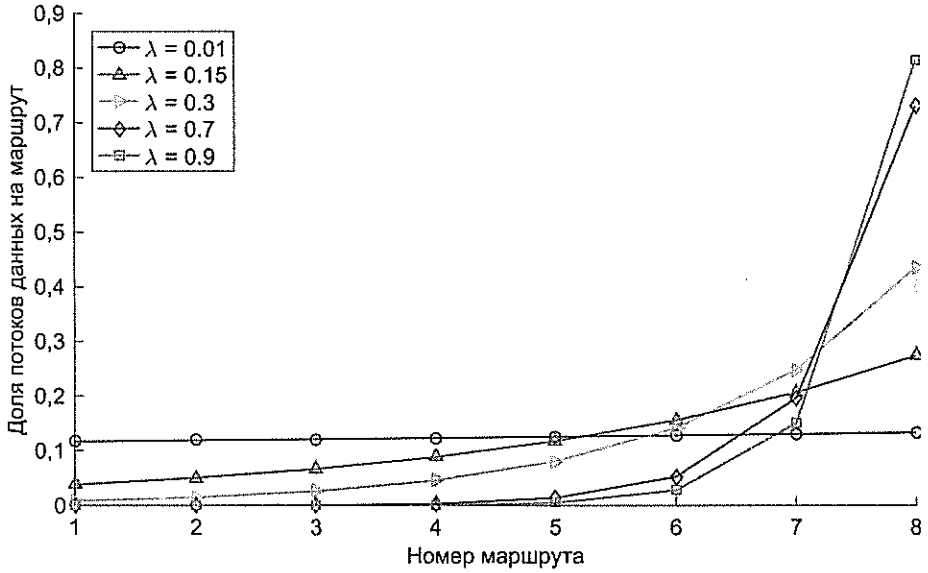


Рис. 2.2. Пропорції розподілу потоків даних за маршрутами

Тепер опишемо спосіб отримання пропорцій розподілу потоку, що не залежить від довжин маршрутів. Для цього беремо пропорції розподілу, отримані на основі експоненціального розподілу, і випадково перерозподіляємо значення пропорцій між маршрутами.

Таким чином, для створення випадкових пропорцій розподілу за маршрутами для одного набору маршрутів випадково вибираємо одне з 4-х розподілів з наступними ймовірностями.

Всі потоки даних по найкоротшому шляху з імовірністю 0,02.

Рівномірний розподіл з ймовірністю 0,02.

Експоненціальний розподіл з ймовірністю 0,48.

Випадково перемішані пропорції на основі експоненціального розподілу з імовірністю 0,48.

Ймовірності обрані дослідницьким шляхом з метою досягнення збіжності алгоритму евристичної оптимізації; значення ймовірностей можуть бути не

оптимальними [11].

Функцією створення випадкового рішення є розрахунок пропорції розподілу вищеописаним способом для всіх наборів маршрутів m_{ij} ; в результаті виходить випадкове рішення $R \quad r_{ij}$. Функцією випадкової зміни рішення є перерахунок пропорцій одного випадково обраного r_{ij} описаним вище способом. Розглянемо функцію оцінки рішення. Функція оцінки рішення оцінює ймовірність втрати пакетів через переповнення буферів ліній НГССЗ. Передбачається, що використовуються вихідні буфери ліній. Для оцінки ймовірності втрати пакетів дане наступне.

Граф супутникової системи $G \quad S, L, C, V$, де S – множина КА, L – множина ліній, C – швидкість передачі для кожної лінії, V – об'єм буфера для кожної лінії.

Множина об'ємів потоків даних за період балансування навантаження в супутниковій системі $F=\{f_{ij}\}, i, j \in S. \quad f_{ij}$ – об'єм потоку даних від КА i до КА j за період балансування навантаження.

Набори маршрутів між кожною парою КА в систем $M \quad m_{ij}$. Значення періоду балансування навантаження T.

Вектор пропорцій розподілу потоків даних між усіма парами КА $s \quad r_{ij}$,..., r_{kl} ,..., r_{mn}.

Функція оцінки рішення заснована на наступному алгоритмі.

Розбиваємо кожен потік f_{ij} на безліч підпотоків, кожен з яких іде по маршруту $m_{ijk} \in m_{ij} \subset M$. Визначаємо об'єми підпотоків, які дорівнюють $f_{ijk} = r_{ijk} f_{ij}$, де $r_{ijk \in} r_{ij} \subset R$. Визначаємо сумарний об'єм потоків даних, що дорівнює сумі об'ємів потоків між усіма парами КА $F_{\Sigma} = \sum f_{ij}$ Створюємо множину N. У цій множині для кожної ліній з L міститься список підпотоків, що проходять через відповідну лінію з L. Щоб отримати множину N, для кожного підпотоку f_{ijk} проходимо по його маршруту m_{ijk} і додаємо до інформації про відповідну лінії номер нового потоку.

Основні параметри розподілу наступні:

мінімальне значення дорівнює 11 маршрутам,

середнє значення дорівнює 87,324 маршрутам,

медіанне значення дорівнює 81 маршруту,

максимальне значення дорівнює 146 маршрутам [14].

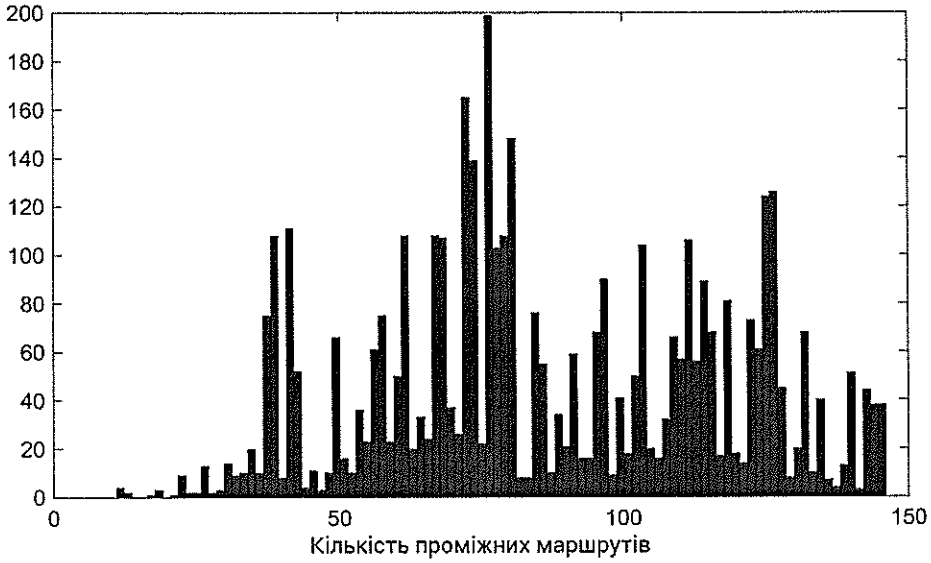


Рис. 2.5. Гістограма розподілу кількості маршрутів

Розглянемо алгоритм визначення набору максимально розрізнених шляхів *V*. Метою алгоритму є знайти набір шляхів, які мають мінімум загальних ліній. Це є завданням оптимізації [15]. Визначимо для задачі оптимізації спосіб оцінки рішення.

Для цього введемо два параметра оцінки набору шляхів. Нехай дано граф супутникової системи $G = (S, L)$, де S – множина КА, L – множина ліній. Нехай дано набір з N шляхів, позначимо його Q. Шлях q_1 в наборі Q представлений у вигляді вектора з 0 і 1, де 0 відповідає тому, що шлях не проходить через відповідну лінію супутникової системи, а 1 - навпаки. Довжина вектора дорівнює кількості ліній в супутниковій системі

$$Q = \{q_1\}, |Q| = N, q_1 = \{0,0,1,...,0,1,0,1\}, |q_1| = |L|. \quad (2.1)$$

Для кожної лінії визначимо кількість шляхів, яке проходить через неї.

Уявімо результати визначення кількості шляхів в вигляді множини E

$$f(Q)=\left\{ \sum_{q_1\in Q, x_1\in q_1, i=1}^{i=|Q|} x_1, \sum_{q_1\in Q, x_2\in q_1, i=1}^{i=|Q|} x_2,\ldots, \sum_{q_1\in Q, x_1\in q_1, i=1}^{i=|Q|} x_l,\ldots, \sum_{q_1\in Q, x_{|q_l|}\in q_1, i=1}^{i=|Q|} x_{|q_l|} \right\}, \qquad (2.2)$$

Суму елементів безлічі E назвемо ступенем завантаження ліній супутникової системи X

$$X = \sum_{x\in E} x. \qquad (2.3)$$

Чим довше шляхи з набору Q, тим через більшу кількість ліній вони проходять, звідси один і той же потік даних завантажить більшу кількість ліній, ніж при використанні більш коротких маршрутів. Чим менше значення X, тим менше навантаження на супутникову систему.

З кожного елемента множини E, який більше 0, віднімемо 1. Підсумуємо всі елементи і отримаємо оцінку того, наскільки розрізнені шляху в наборі. Назвемо цю оцінку ступенем розрізненості набору шляхів Y.

Ступінь розрізненості Y означає наступне. Нехай дано два набори по п'ять шляхів, кожен з яких проходить через три лінії. У першому наборі всі маршрути проходять через різні лінії, тобто ні в однієї пари маршрутів немає загальних ліній. У другому наборі всі маршрути проходять через одні й ті ж лінії, тобто повністю збігаються. Ступінь завантаження ліній X в обох маршрутів дорівнює 15. Ступінь розрізненості Y у першого набору дорівнює 0, тому що через кожну лінію проходить не більше одного маршруту, а другого набору дорівнює 12, тому що через три лінії проходять всі 5 маршрутів. Таким чином, чим менше значення Y набору маршрутів, тим менше у маршрутів загальних ліній.

Оцінка набору маршрутів зводиться до обчислення X и Y. Набір маршрутів A краще набору B в тому випадку, якщо $Y_A = Y_B$. Якщо значення Y рівні, то кращим буде той набір, у якого значення X найменше. У цьому випадку ми отримуємо такий же розрізнений набір, але з більш короткими маршрутами. Тепер вирішимо завдання оптимізації для знаходження набору максимально

розрізнених шляхів. Для цього використовуємо алгоритм імітації відпалювання. Наведемо параметри алгоритму імітації відпалу для пошуку набору максимально розрізнених шляхів:

Спосіб представлення та модифікації рішення. Дано вихідна множина I з N шляхів. Потрібно знайти множину із k = N (якщо k 1, то отримаємо найкоротший по кількості стрибків шлях) максимально розрізнених шляхів V. Рішенням буде вектор r r1, r2,..., rk , який складається з k неповторюваних маршрутів, взятих з I. Для модифікації рішення випадково вибираємо один з маршрутів в r і замінюємо на будь-який інший випадково обраний маршрут з I. Новий маршрут не повинен збігатися з жодним з тих, що вже находяться в r .

Критерій переходу до нового рішення. Модифіковане рішення r □, створене на основі рішення r_i , стає рішенням r_{i+1} з імовірністю $P\left(r^*, r_{i+1}\right)$, яка визначається наступним виразом

$$P\left(\vec{r}^*, \vec{r}_{i+1}\right) = \begin{cases} 1, якщо \quad Y\left(\vec{r}^*\right) - Y\left(\vec{r}_i\right) < 0; \\ e^{-\left(Y\left(\vec{r}^*\right) - Y\left(\vec{r}_i\right)\right)/t}, якщо \quad Y\left(\vec{r}^*\right) - Y\left(\vec{r}_i\right) \geq 0; \\ 1, якщо \quad Y\left(\vec{r}^*\right) - Y\left(\vec{r}_i\right) = 0 \wedge X\left(\vec{r}^*\right) - X\left(\vec{r}_i\right) < 0; \\ 0, якщо \quad Y\left(\vec{r}^*\right) - Y\left(\vec{r}_i\right) = 0 \wedge X\left(\vec{r}^*\right) - X\left(\vec{r}_i\right) \geq 0; \end{cases} \tag{2.4}$$

де $Y\left(\vec{x}\right)$ – значення параметра ступеня розрізненості маршрутів, $X\left(\vec{x}\right)$ – значення параметра ступеня завантаження ліній набором маршрутів [16].

Початкова температура системи. Визначимо значення початкової температури системи наступним чином. Створимо тисячу випадкових рішень і модифікуємо їх. Потім визначимо модуль різниці їх параметрів ступеня розрізненості $\left|Y\left(x^*\right) - Y\left(x_i\right)\right|$. В результаті отримуєте 1000 значень різниці параметрів. Визначимо квантиль безлічі на рівні 90%. Початкову температуру потрібно вибирати такою, щоб ймовірність переходу на рішення гірше поточного була близька до 1. Якщо відношення різниці параметрів до початкової температурі буде 0,01, то значення ймовірності переходу дорівнює $e^{-0,01} \approx 0,99$.

Звідси ділимо значення квантиля на рівні 90% на 0,01 і отримуємо значення початкової температури. Таким чином, отримуємо початкову температуру, при якій в 90% випадках ймовірність переходу на рішення гірше поточного буде більше 0,99.

Функція зниження температури. Скористаємося наступною функцією t_k t_k 1, 0,1 . визначається дослідним шляхом.

Кількість ітерацій до зниження температури □ . Визначається дослідним шляхом .

Критерій завершення пошуку рішення. Певна кількість знижень температури □. Визначається дослідним шляхом.

Три останніх параметра визначаються дослідним шляхом. Опишемо спосіб дослідного визначення цих параметрів.

Була створена чотиривимірні сітка з трьох параметрів алгоритму і множини значень k .

Для пошуку a було взято 31 значення a. Значення розподілені на інтервалі (0, 1).

Кількість ітерацій до зниження температури бралося в діапазоні від 30 до 100 ітерацій з кроком 10 ітерацій.

Кількість зниження температури бралося рівним 100, 75 і 50. 4. k {{x : x N x 1 x 10}{15,20,25,30}}.

Потім запускався алгоритм оптимізації і будувався графік пошуку рішення (графік охолодження в термінах алгоритму імітації відпалювання).

Оптимізація виконувалася тільки на одній множині I, N = 78, k {{x : x N □ x □1□ *x* □10}□{15,20,25,30}}, і для кожної точки в чотиривимірному просторі проводилося тільки одне випробування. На рис. 6 зображений графік охолодження алгоритму імітації відпалювання для пошуку набору з 30 максимально розрізнених маршрутів з початкової множини з 78 маршрутами. Графік показує значення параметра розрізненості знайденого набору маршрутів на останній ітерації перед зниженням температури.

Варто вибирати ті значення параметрів, при яких забезпечувалося найменше

значення функції, що мінімізується на останній ітерації. Але, вивчивши графіки, видно, що значення функції, що мінімізується. Тому на догоду швидкості виконання алгоритму були обрані вищевказані значення [17].

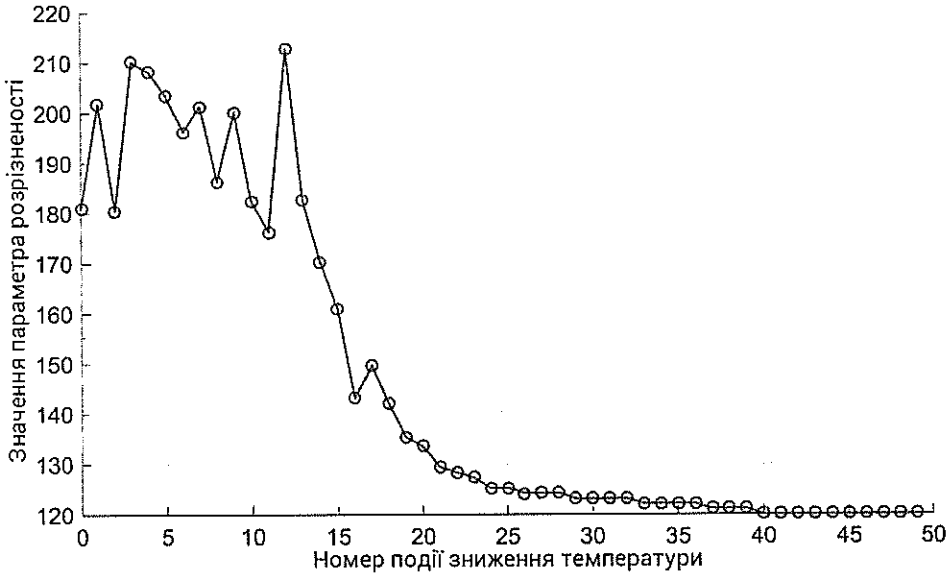


Рис. 2.6. Графік охолодження алгоритму імітації відпалювання

Таким чином, для НГССЗ з параметрами, аналогічними НГССЗ «Iridium», проведені розрахунки наборів максимально розрізнених маршрутів розміром від 1 до 30 с $N_{\max} = 4$ для визначення вихідної множини. Підібрані наступні параметри.

Функція зниження температури. t_k t_k 1 , де 0,7 .

Кількість ітерацій перед зниженням температури □ – 50.

Критерій зупинки. Число знижень температури □ – 50.

На рис. 2.7 показаний результат пошуку набору з трьох максимально розрізнених маршрутів, знайденого за допомогою вищеописаного алгоритму пошуку набору максимального розрізнених шляхів. У цих маршрутів немає жодної спільної лінії [18].

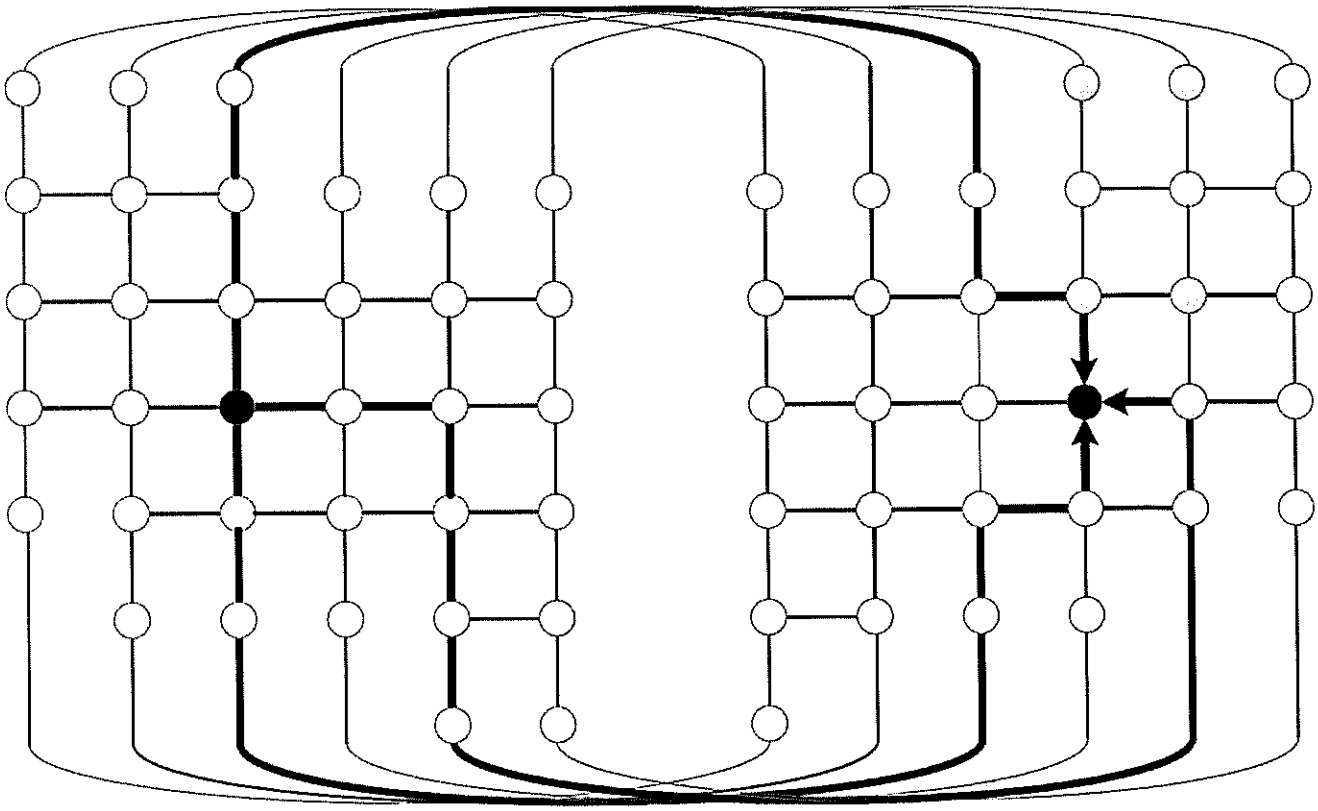


Рис. 2.7. Набір з трьох максимально розрізнених маршрутів

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Імітаційна модель супутникової системи

НГССЗ з міжсупутниковими лініями є сукупністю великої кількості статистично залежних систем масового обслуговування. Точні аналітичні вирази для аналізу такої системи навіть з безліччю спрощень отримати практично неможливо.

Тому в даний час найбільш точним (і практично єдиним) способом дослідження НГССЗ є імітаційне моделювання.

Проведемо аналіз запропонованого алгоритму шляхом імітаційного моделювання.

Ми розглядаємо супутникову систему як мережу. Мережа визначається топологією. Топологія – це сукупність вузлів, ліній між вузлами і властивостей ліній. З властивостей ліній для моделі важливі затримка розповсюдження лінії і пропускна здатність [19].

Сукупність вузлів (супутників) і затримка поширення лінії, яка визначається відстанню між КА, визначається складом супутникового угруповання, орбітальними параметрами КА угруповання, мінімальним кутом місця забезпечення радіозв'язку, граничної широтою відключення міжорбітальних ліній, кількістю міжсупутникових ліній.

Одним із прикладів НГССЗ є НГССЗ з параметрами, аналогічними НГССЗ «Iridium».

Тому виберемо параметри моделі НГССЗ рівними опублікованим параметрам системи «Iridium» (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Параметри супутникової групи

Висота орбіти	780 км
Кількість площин	6
Кількість КА в площині	11
Нахил орбіти	86,4°
Різниця довготи висхідного вузла між площинами	31,6°
Різниця довготи висхідного вузла між протилежно обертовими площинами	22°
Мінімальний кут місця	8,2°
Кількість міжсупутникових ліній	4
Гранична широта міжсупутникових ліній	60°
Пропускна здатність міжсупутникових ліній	25 Мбіт/с
Сумарна пропускна здатність ліній вниз / вгору одного КА	2 Мбіт/с

Моделі терміналів і супутників

Модель терміналу є джерело пакетів з Парето розподіленими періодами вмикання та вимикання з параметром 1, 2 і математичним очікуванням тривалості періодів включення і виключення m рівним 200 мс. При моделюванні для потоків даних вибираються максимальні швидкості передачі даних V_t від 0,5 Мбіт/с до 1,5 Мбіт/с з кроком 0,1 Мбіт/с.

Тривалість l періодів вмикання та вимикання джерел визначається на основі Парето розподілу наступним чином:

$$l = \frac{m \cdot (\alpha - 1)/\alpha}{(1 - r)^{1/\alpha}}, r \in [0; 0{,}999]. \quad (3.1)$$

де r – оператор генерації рівномірно розподіленим випадкової величини r [0;0,999].

Під час періодів вмикання термінали безперервно передають пакети обсягом z = 8192 біт з постійними швидкостями передачі даних, зазначеними

вище. Ці швидкості не є середніми [20].

На рис. 3.1 показана гістограма розподілу кількості переданих пакетів за період включення випадкової тривалості для швидкості 0,5 Мбіт/с. Довжина вибірки дорівнює 106. Кількість пакетів $n = [l/(z/V_t)]$. Пакет буде переданий тоді, коли час початку передачі знаходиться в межах періоду включення, тому кількість пакетів округляймо вгору до цілого числа. z/V_t – це час передачі (обслуговування) одного пакета терміналом, воно становить від $8192/0.5 \cdot 10^6 \approx 0{,}016$с до $8192/1{,}5 \cdot 10^6 \approx 0{,}005$ с. Потім пакет буде доставлений на КА через час d_t,що дорівнює часу поширення сигналу до КА. Таким чином, пакет після створення терміналом надходить від терміналу на КА через час $D_t = z/V_t + d_t$. Параметри розподілу кількості пакетів для 0,5 Мбіт/с і 1,5 Мбіт/с наступні (спочатку йде значення параметра для 0,5 Мбіт / с):

мінімальне значення: 3 і 7;

середнє значення: 8,881 і 25,539;

медіанне значення: 4 і 11;

максимальне значення: 643 і 1930.

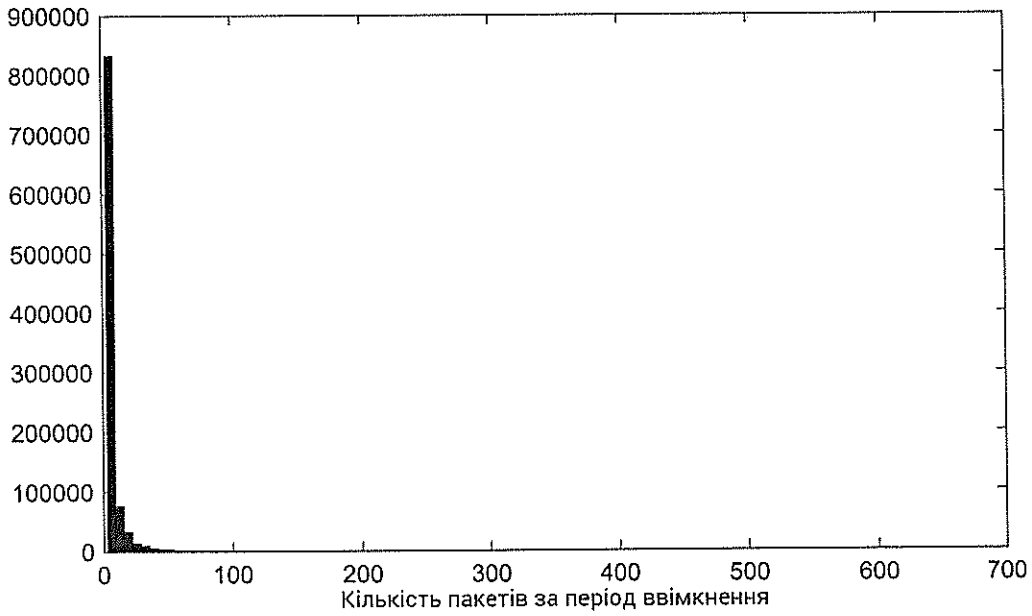


Рис. 3.1. Гістограма розподілу кількості переданих пакетів за періоди включення випадкової тривалості для інтенсивності потоків даних 0,5 Мбіт/с

У моделі задані 700 терміналів, які випадковим чином розташовані на поверхні Землі в 7 областях: Україна, Азія, Європа, Африка, Північна Америка, Південна Америка, Океанія. У кожній області випадковим чином рівномірно розташовані 100 терміналів. На рис. 3.2 зображено розподіл терміналів по поверхні Землі.

Таблиця 3.2.

Розподіл потоків даних, %

	Україна	Європа	Азія	Африка	Океанія	Північна Америка	Південна Америка
Україна	60	15	10	5	2	10	5
Європа	15	35	10	25	10	10	12
Азія	7	10	60	5	12	10	8
Африка	3	2	2	20	2	2	2
Океанія	2	3	6	3	34	3	3
Північна Америка	10	30	10	40	38	55	30
Південна Америка	3	5	2	2	2	10	40

Кожен термінал генерує потік даних певному одержувачу. Одержувач обирається випадковим чином в пропорціях, описаних в таблиці 3.2. Наприклад, 60% терміналів, що знаходяться в Україні, передають дані терміналів, що знаходяться в Україні, 15% терміналів передають дані терміналів, що знаходяться в Європі. Це змінена версія розподілу потоків даних з публікації [21].

Модель КА є маршрутизатор з чотирма вхідними та вихідними міжсупутниковими лініями, а також з лінією вниз і вгору для зв'язку з абонентськими терміналами.

Для ліній вниз затримка черги не моделюється, швидкість передачі ліній вниз така ж, як і у терміналів (у лінії вгору), тому затримка передачі пакета від КА

до терміналу дорівнює $D_t = z/V_t + d_t$.

У кожної вихідної міжсупутникової лінії є буфер, який є FIFO чергою довжиною в 200 пакетів об'ємом z. Швидкість передачі міжсупутникової лінії V_s дорівнює 25 Мбіт/с, час передачі z/V_s (обслуговування) пакета становить $8192/25 \cdot 10^6 \approx 3.277 \cdot 10^{-4}$ с.

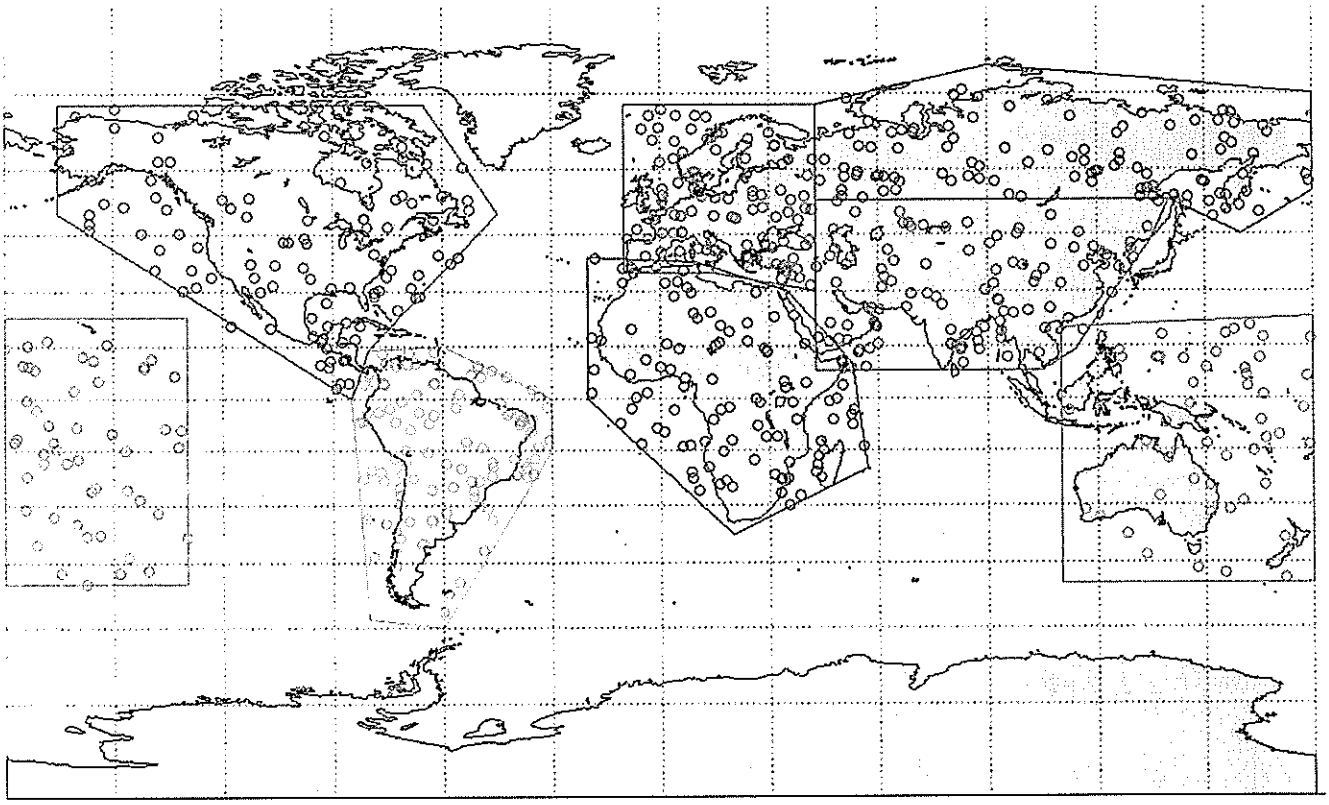


Рис. 3.2. Розподіл терміналів по поверхні Землі

Коли пакет приходить на КА і наступним одержувачем буде інший КА, а не термінал в області покриття поточного КА, то пакет моментально додається в вихідну чергу відповідної лінії відповідно до таблиці маршрутизації. Якщо черга переповнена, то пакет відкидається. Якщо черга порожня, то пакет передається наступному КА.

Затримки роботи маршрутизуючого обладнання не моделюються, і затримка передачі пакета, який тільки що прийшов, наступного КА визначається тільки довжиною черги, швидкістю передачі міжсупутникової лінії і відстанню до

наступного КА: $D_s = z/V_s + d_s + n \cdot z/V_s$, де n – поточна кількість пакетів в черзі (пакет, що прийшов, ще не доданий в чергу).

Затримка оновлення таблиць маршрутизації, час розрахунку таблиць маршрутизації і час передачі інформації про потоках даних теж не моделюється; вищеперелічене в рамках моделі відбувається миттєво.

3.2 Порівняння запропонованого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку з іншими алгоритмами

Розглянемо результати імітаційного моделювання запропонованого алгоритму і порівняння запропонованого алгоритму з наступними трьома алгоритмами.

Алгоритм маршрутизації з найкоротшими шляхами.

Алгоритм маршрутизації з рівномірним розподілом потоків даних за маршрутами.

Алгоритм з пошуком розподілу, при якому мінімізується значення завантаження найбільш завантаженої лінії.

Результати моделювання наведені на графіках. Значення кожної точки графіків є середнім значенням 20 випробувань, довірчі інтервали розраховані для довірчої ймовірності 0,99. Тривалість моделювання 300 с. Період балансування навантаження дорівнює 20 с. У перший період балансування навантаження немає даних про попередні обсяги потоків даних, тому для запропонованого алгоритму використовуються найкоротші шляхи [22].

Зробимо зауваження з приводу порівнюваних алгоритмів.

Для вирішення завдання управління балансуванням навантаження для запропонованого алгоритму обраний генетичний алгоритм. Одна з основних переваг генетичного алгоритму – це простота паралельної реалізації. Збільшуючи розмір популяції генетичного алгоритму і паралельно обробляючи елементи популяції, можна значно прискорити знаходження рішення.

У таблиці 3.3 представлені параметри генетичного алгоритму, використані при моделюванні. У генетичному алгоритмі використовується одноточковий кросовер і відбір елітних особин в наступне покоління.

Таблиця 3.3.

Параметри генетичного алгоритму

Розмір популяції	40
Кількість поколінь	100
Частка елітних особин	0,15
Імовірність мутації	0,05
Імовірність кросовера	0,85

Розглянемо властивості генетичного алгоритму докладніше. Генетичний алгоритм складається з наступних кроків.

Створення початкової популяції – початкової множини рішень.

Оцінка ймовірності втрати пакетів для кожної особини.

Відбір елітних особин в наступне покоління.

Відбір особин-кандидатів в наступне покоління.

Кросовер особин-кандидатів.

Мутація особин-кандидатів.

Оцінка ймовірності втрати пакетів для кожної особини.

Відбір N' особин-кандидатів в наступне покоління, $N' = N - N_e$, де N – розмір популяції, N_e – число елітних особин, які будуть відібрані наступне покоління. Збільшення числа створених поколінь на одиницю.

9. Якщо число створених поколінь $P < P_{\max}$, де $P_{\max}$ максимальне число поколінь, то переходимо до кроку 3. Якщо $P = P_{\max}$, то переходимо до кроку 10.

10. Вибираємо особу з найменшою оцінкою ймовірності втрати пакетів.

Випадкове створення рішення (крок 1), оцінка ймовірності втрати пакетів (крок 2 і 7) та випадкове зміна рішення (мутація) (крок 6) вже описані вище.

Розглянемо останні кроки алгоритму.

Для відбору елітних особин (крок 3) в наступне покоління копіюємо $N_Э$ особин з найменшою оцінкою ймовірності втрати в наступне покоління.

Для відбору особин-кандидатів (крок 4) в наступне покоління використовується алгоритм ранжирування. Спочатку сортуємо особини поточного покоління за спаданням ймовірності помилки. Потім кожній особині присуджується ранг, рівний її порядковому номеру. У кращої особини з найменшою оцінкою ймовірності втрати пакетів буде найбільший ранг, рівний N. Потім випадково вибираємо N особин, які стануть кандидатами в наступне покоління (при цьому можуть виходити копії особин). Можливість вибору однієї особини дорівнює відношенню рангу особини до суми рангів.

Розглянемо алгоритм кросовера (крок 5). Будемо проводити однокрапковий кросовер. Для цього вибираємо випадкове число від 2 до значення розмірності вектора пропорцій розподілу особини. Починаючи з цього елемента, проведемо обмін елементами вектора пропорцій двох рішень. Ми не замінюємо, починаючи з першого елемента, так як, якщо поміняти всі елементи місцями, то отримаємо ті ж два рішення, що і були до кросовера [23].

Спосіб вибору пар для кросовера наступний. Береться безліч особин, рівноімовірно обирається одна з особин. Видаляється цю особину зі списку особин, які можна вибирати. Потім вибирається рівноімовірно друга особину. Цю особину також видаляють зі списку вибору. Так утворюється перша пара. Потім обираються інші пари, поки не залишиться одна або жодної особини. Між створеними парами проводиться кросовер з ймовірністю кросовера. Та особина, у якої немає пари залишається незмінною.

Розглянемо спосіб відбору особин в наступне покоління (крок 8). На цьому етапі вже відібрано N_e елітних особин в наступне покоління. Тепер береться $N' = N - N_e$ особин з найменшою оцінкою ймовірності втрати пакетів серед безлічі особин-кандидатів і додають цих особин в наступне покоління. Після вибору особин в наступне покоління ітерація циклу генетичного алгоритму

завершується.

В алгоритмі маршрутизації з найкоротшими шляхами використовується алгоритм Дейкстри для знаходження найкоротшого шляху. Найкоротші шляхи шукаються по затримці поширення ліній. Відповідно кожен потік даних в НГССЗ не розподіляють по множині шляхів, а передається по одному найкоротшому шляху.

В алгоритмі з рівномірним розподілом потоків по маршрутам кожен потік в НГССЗ розподіляється порівну між доступними маршрутами.

Наведемо алгоритм з пошуком розподілу, при якому мінімізується значення завантаження найбільш завантаженої лінії. При вирішенні задачі оптимізації для вирішення задачі балансування навантаження одним з найпоширеніших показників того, наскільки добре рішення, є значення рівня завантаження найбільш завантаженої лінії в системі. Цей алгоритм заснований на запропонованому алгоритмі, тільки якість рішення оцінюванням не по оцінці ймовірності втрати пакетів, а за значенням завантаження найбільш завантаженої лінії [24].

На рис. 3.2 показані графіки залежності ймовірності втрати пакетів від інтенсивності потоків даних, в таблиці 4 показані значення довірчих інтервалів. Найбільша вірогідність втрати у алгоритму маршрутизації з найкоротшими шляхами. Потім в сторону зменшення ймовірності втрати пакетів йде алгоритм маршрутизації з рівномірним розподілом.

У запропонованого алгоритма більша ймовірність втрати пакетів, ніж у алгоритма маршрутизації, що використовує значення завантаження максимально завантаженій лінії, в діапазоні інтенсивностей від 0,5 Мбіт/с до 1,1 Мбіт/с. Починаючи з 1,2 Мбіт/с, у запропонованого алгоритму ймовірність втрати пакетів значно менше.

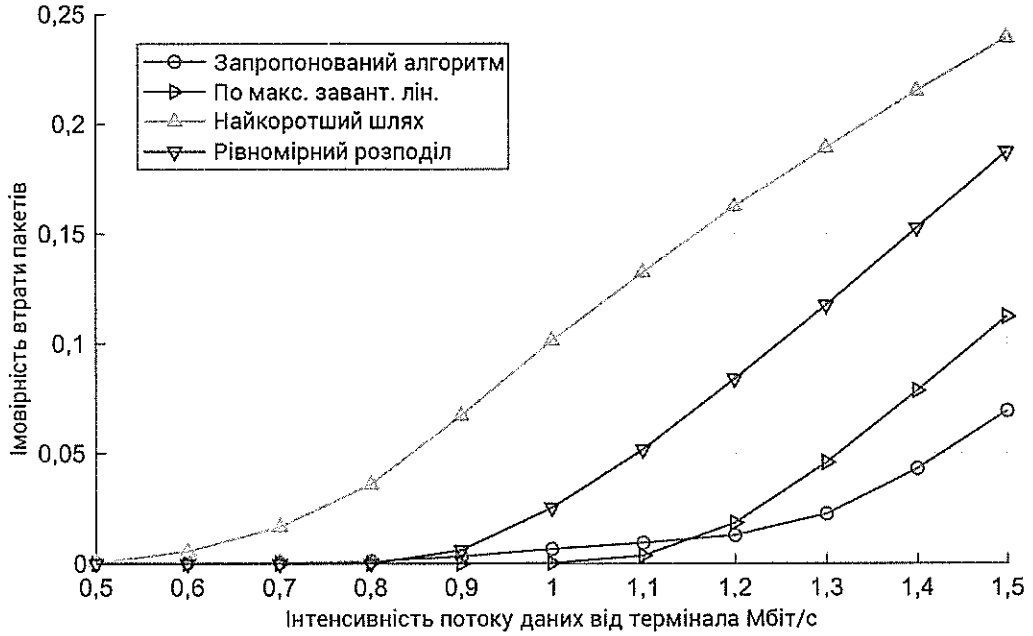


Рис. 3.2. Залежність ймовірності втрати пакетів від інтенсивності потоків даних

Таблиця 3.4.

Значення довірчих інтервалів для оцінок ймовірності втрати пакетів при довірчій ймовірності 0,99

Інтенсивність потоку даних, Мбіт/с	Запропонований алгоритм	По максимально завантаженій лінії	Найкоротший шлях	Рівномірний розподіл
0,5	0,000137	0,000000	0,000165	0,000000
0,6	0,000217	0,000001	0,000732	0,000001
0,7	0,000221	0,000002	0,000847	0,000002
0,8	0,000465	0,000004	0,001273	0,000061
0,9	0,000763	0,000024	0,001380	0,000801
1,0	0,000831	0,000137	0,002112	0,001391
1,1	0,001074	0,000775	0,002043	0,001459
1,2	0,001028	0,002443	0,001897	0,001643
1,3	0,001923	0,003851	0,002269	0,002211
1,4	0,002667	0,004356	0,001974	0,001716
1,5	0,002054	0,004120	0,001487	0,001759

На рис. 3.3 показані графіки залежності пропускної здатності НГССЗ від інтенсивності потоків даних, в таблиці 3.5 показані значення довірчих інтервалів. Співвідношення між алгоритмами таке ж, як і у випадку з графіками ймовірності втрати пакетів, тому що ймовірність втрати пакетів і пропускна здатність системи взаємопов'язані. Найменшу пропускну здатність забезпечує алгоритм з найкоротшими шляхами. Починаючи з 1,2 Мбіт/с, запропонований алгоритм забезпечує найбільшу пропускну здатність.

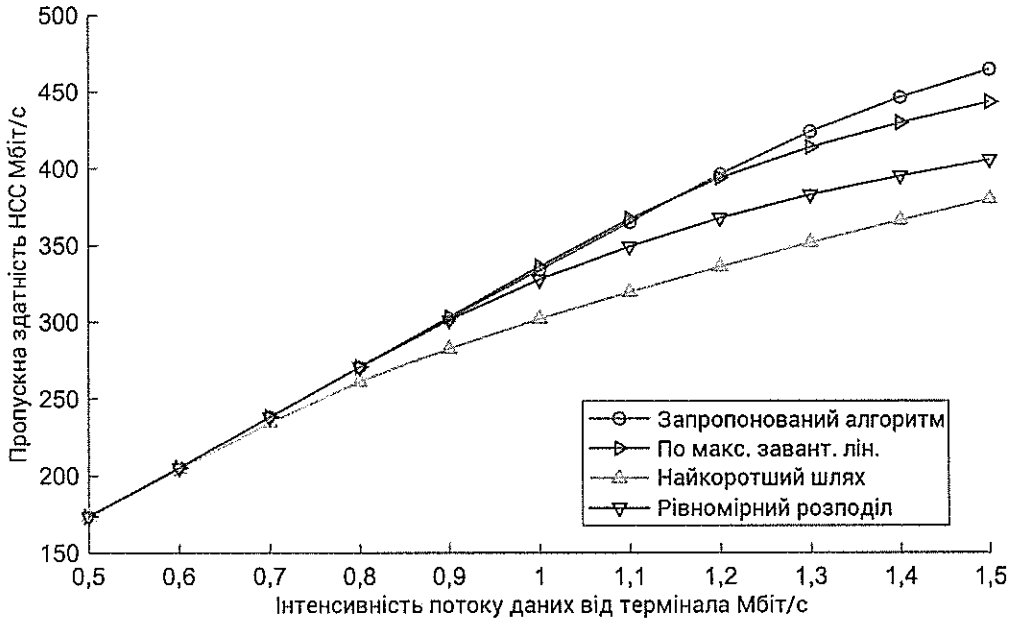


Рис. 3.3. Залежність пропускної здатності НССЗ від інтенсивності потоків даних

Те, що запропонований алгоритм забезпечує меншу ймовірність втрати пакетів і велику пропускну здатність НГССЗ, починаючи з інтенсивності 1,2 Мбіт/с і вище, в порівнянні з алгоритмом з оцінкою рішення по максимально завантаженій лінії, пояснюється наступним. В алгоритмі з оцінкою рішення по максимально завантаженій лінії ми знаходимо рішення з мінімальним значенням завантаження максимально завантаженій лінії. Якщо інтенсивність потоків даних низька, то розподіл потоків виходить таким, що у всіх ліній в системі буде багато залишкової смуги пропускання [25].

Таблиця 3.5.

Значення довірчих інтервалів для оцінок пропускної здатності НССЗ при довірчій ймовірності 0,99

Інтенсивність потоку даних, Мбіт/с	Запропонований алгоритм, Мбіт/с	По максимально завантаженій лінії, Мбіт/с	Найкоротший шлях, Мбіт/с	Рівномірний розподіл, Мбіт/с
0,5	0,593106	0,603002	0,584780	0,602906
0,6	0,723329	0,725919	0,661324	0,725850
0,7	0,866883	0,852004	0,801358	0,851925
0,8	0,988778	0,971357	0,732513	0,969956
0,9	1,046215	1,092967	0,866007	0,988974
1,0	1,279149	1,198654	0,794856	0,976572
1,1	1,405149	1,272811	0,948630	0,923294
1,2	1,373046	1,601512	1,012883	0,971127
1,3	1,138735	1,544842	1,038564	0,745429
1,4	1,778281	1,679337	1,089635	0,949731
1,5	1,396089	2,240311	1,273059	0,929217

В результаті цього при великих стрибках інтенсивності потоків втрачається менше пакетів, тому що в лініях великий запас залишкової пропускної здатності. У запропонованому ж алгоритмі оцінюється ймовірність втрати пакетів. При низькій інтенсивності потоків, коли перевантаження ліній, переповнення буферів, а звідси і втрати пакетів майже неможливі, запропонований алгоритм посилає майже всі потоки даних по найкоротших шляхах. В результаті в цих лініях буде значно менше залишкової пропускної здатності, ніж в інших лініях НССЗ. Тоді при різкому стрибку інтенсивності ймовірність втрати пакетів в буферах цих ліній значно вище. Тому при низьких інтенсивностях від 0,5 Мбіт/с до 1,1 Мбіт/с алгоритм з оцінкою рішення по максимально завантаженій лінії забезпечує меншу ймовірність втрати пакетів і більше пропускну здатність, ніж запропонований алгоритм з оцінкою рішення по ймовірності втрати пакетів. При високій

інтенсивності потоків алгоритм з оцінкою рішення по максимально завантаженій лінії вже не може забезпечити велику залишкову пропускну здатність в лініях. Це пов'язано з наступним. Можна зменшити рівень завантаження найбільш завантаженої лінії, перенаправивши потоки в обхід по інших маршрутах, які будуть в більшості випадків довше початкових. В результаті навантажити більше число ліній [26]. При великій інтенсивності потоків може статися так, що до перенаправлення була перевантажена тільки одна лінія, а після – декілька. Тому зменшення ступеня завантаження найбільш завантаженої лінії в системі при великій інтенсивності потоків веде до збільшення ймовірності втрати пакетів замість очікуваного зменшення. Такого недоліку немає у запропонованого алгоритму.

На рис. 3.4 зображені графіки залежності середньої затримки пакету в черзі від інтенсивності потоків даних, значення довірчих інтервалів показані в таблиці 3.6. Поведінка графіків залежності затримки черги (рис. 3.4) схоже на поведінку графіків залежності ймовірності втрати пакетів (рис. 3.2), так як і затримка черги, і ймовірність втрати пакетів через переповнення буфера лінії пов'язані з кількістю пакетів в чергах.

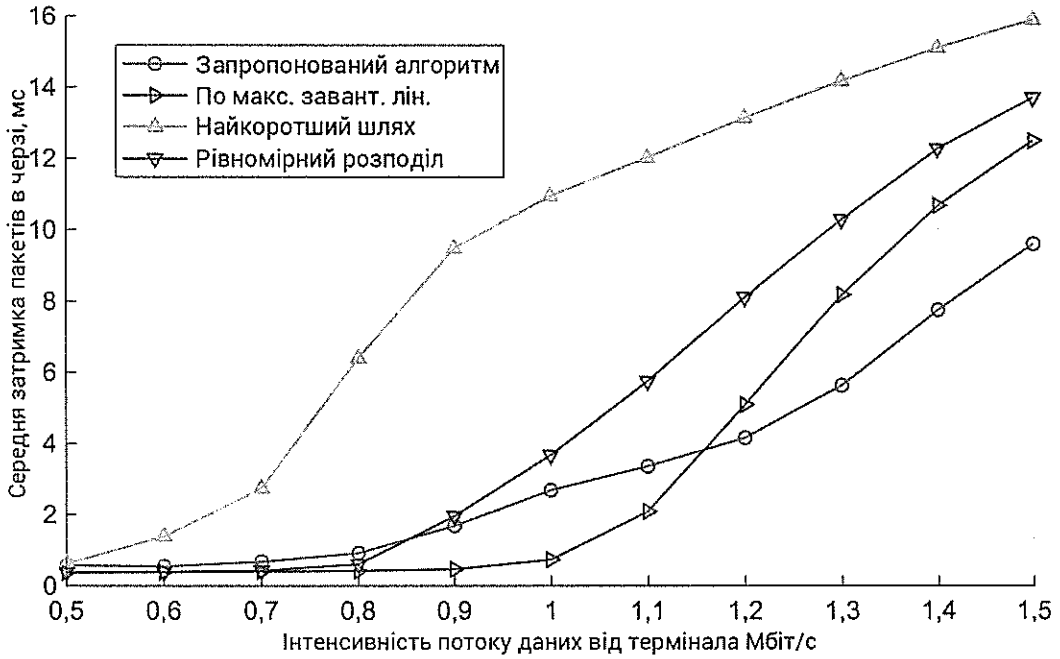


Рис. 3.4. Залежність середньої затримки пакету в черзі від інтенсивності потоків даних

Таблиця 3.6.

Довірчі інтервали оцінок середньої затримки пакету в черзі при довірчій ймовірності 0,99

Інтенсивність потоку даних, Мбіт/с	Запропонований алгоритм мс	По максимально завантаженій лінії, мс	Найкоротший шлях, мс	Рівномірний розподіл, мс
0,5	0,051561	0,000516	0,070023	0,000416
0,6	0,064760	0,000595	0,087117	0,000617
0,7	0,083799	0,001123	0,161688	0,001710
0,8	0,121495	0,002347	0,238845	0,029184
0,9	0,142932	0,009631	0,222282	0,109629
1,0	0,175748	0,054920	0,167374	0,070977
1,1	0,171969	0,203800	0,157811	0,109280
1,2	0,171132	0,383702	0,098174	0,112783
1,3	0,226321	0,353585	0,106486	0,139977
1,4	0,257557	0,360057	0,137883	0,135479
1,5	0,307682	0,296421	0,174174	0,109409

У алгоритму з найкоротшими шляхами найбільша середня затримка черзі. Потім в сторону зменшення йде алгоритм з рівномірним розподілом. Від 0,5 Мбіт/с до 1,1 Мбіт/с у алгоритму з оцінкою рішень по максимальному завантаженні ліній найменша середня затримка черзі. Починаючи з 1,2 Мбіт/с і вище, у запропонованого алгоритму найменша середня затримка черги.

На рис. 3.5 зображені графіки залежності середньої затримки маршруту пакетів в залежності від інтенсивності потоків даних, значення довірчих інтервалів показані в таблиці 3.7.

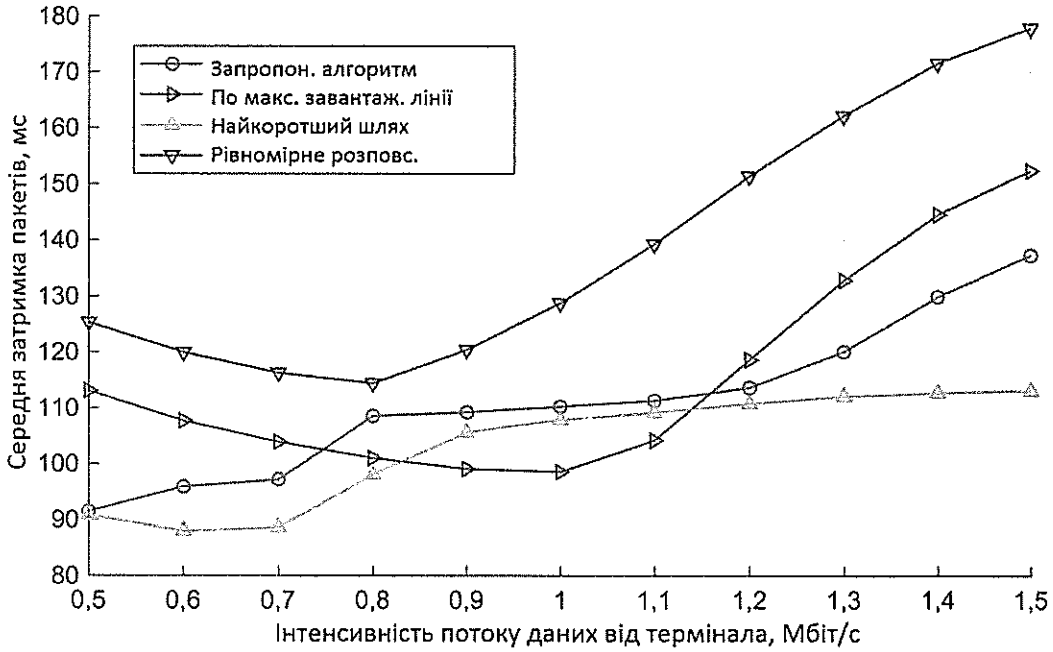


Рис. 3.5. Залежність середньої затримки пакета від інтенсивності потоків даних

Таблиця 3.7.

Довірчі інтервали оцінок середньої затримки доставки пакетів при довірчій ймовірності 0,99

Інтенсивність потоку даних, Мбіт/с	Запропонований алгоритм, мс	По максимально завантаженій лінії, мс	Найкоротший шлях, мс	Рівномірний розподіл, мс
0,5	1,041130	0,392912	0,266407	0,082265
0,6	1,387243	0,317959	0,330632	0,098645
0,7	0,546385	0,462482	0,598067	0,086110
0,8	1,841582	0,440668	0,901453	0,229824
0,9	1,174845	0,444067	0,732376	0,707288
1,0	1,022528	0,446512	0,649960	0,456052
1,1	1,086311	1,312379	0,690843	0,652917
1,2	1,234834	2,122907	0,653795	0,710719
1,3	1,229684	1,995954	0,894390	0,887660
1,4	1,454648	1,918899	0,649261	0,725012
1,5	1,547120	1,674792	0,995721	0,468534

У алгоритмі з найкоротшими шляхами середня затримка менше для всіх значень інтенсивностей, ніж у запропонованого алгоритму. Це пов'язано з тим, що, щоб передати пакети без втрат, запропонований алгоритм спрямовує потоки даних по більш довгим шляхам, не тільки по найкоротшому шляху.

Починаючи з 1,2 Мбіт / с і вище, у запропонованого алгоритму менше середня затримка, ніж у алгоритму з оцінкою рішень по максимально завантаженій лінії. Як було сказано вище, алгоритм з оцінкою рішень по максимально завантаженій лінії при високій інтенсивності може вибирати такі рішення, які навпаки більше перевантажують лінії, ніж розвантажують. В результаті збільшення завантаження ліній збільшується затримка черги. А зі збільшенням затримки черги росте і затримка маршруту. У діапазоні від 0,5 Мбіт/с до 0,7 Мбіт/с середня затримка пакетів у запропонованого алгоритму також менше. Це пов'язано з тим, що запропонований алгоритм може передавати пакети по коротким шляхах до тих пір, поки не губляться пакети. Алгоритм з оцінкою рішень по максимальному завантаженні ліній розподіляє потоки з самого початку за різними маршрутами, щоб зменшити максимальне завантаження ліній. Ці маршрути часто довше, ніж в разі запропонованого алгоритму.

ВИСНОВКИ

У даній роботі запропоновано алгоритм централізованої багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в негеостаціонарних супутникових системах зв'язку з міжсупутниковими лініями.

Завдання багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження задано як завдання знаходження таких пропорцій розподілу потоків даних за розділами маршрутів, при яких мінімізується ймовірність втрати пакетів в НГССЗ. Завдання маршрутизації з балансуванням навантаження є NP складною проблемою оптимізації пошуку пропорцій розподілу потоків по заданим маршрутам. Тому рішення знаходиться евристичними алгоритмами оптимізації. Для евристичного алгоритму оптимізації, вирішального завдання багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження, запропоновані основні необхідні функції: функція оцінки рішення, випадкового створення рішення, випадкового зміни рішення. Для вирішення завдання маршрутизації з балансуванням навантаження обраний генетичний алгоритм оптимізації. Підібрані параметри генетичного алгоритму оптимізації.

Основною новизною роботи є алгоритм пошуку набору маршрутів, що мають мінімум загальних ліній, і алгоритм оцінки ймовірності втрати пакетів в НГССЗ при переповненні вихідних буферів міжсупутникових ліній.

Проведено аналіз запропонованого алгоритму централізованої багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в НГССЗ і порівняння з іншими алгоритмами на основі імітаційного моделювання. З результатів імітаційного моделювання випливає, що запропонований алгоритм забезпечує:

1. Низьку вірогідність втрати пакетів при переповненні вихідних буферів міжсупутникових ліній НГССЗ в порівнянні з іншими розглянутими при імітаційному моделюванні алгоритмами.

2. Високу пропускну здатність НГССЗ в порівнянні з іншими розглянутими при імітаційному моделюванні алгоритмами.

3. Низьку затримку черги в порівнянні з іншими розглянутими при імітаційному моделюванні алгоритмами.

Відзначені шляхи поліпшення запропонованого алгоритму:

1. Додавання алгоритму QoS маршрутизації до запропонованого алгоритму. У запропонованому алгоритмі визначаються пропорції розподілу потоків даних за маршрутами. Можна в межах цих пропорцій розподіляти потоки даних відповідно до їх вимог.

2. Поєднання запропонованого алгоритму з алгоритмом мінімізації завантаження максимально завантаженій лінії. Як показало імітаційне моделювання, при низьких інтенсивностях потоків даних мінімізація завантаження максимально завантаженій лінії забезпечує меншу ймовірність втрати пакетів, ніж запропонований алгоритм. Запропонований алгоритм, в свою чергу, забезпечує меншу ймовірність втрати пакетів при високих інтенсивностях потоків даних. Необхідно адаптивно поєднувати два алгоритми, щоб досягти найменшої імовірності втрати пакетів на всьому діапазоні інтенсивностей потоків даних.

3. Розробка алгоритму оцінки ймовірності втрати пакетів для загального вхідного буфера ліній (запропонований алгоритм розроблений для випадку окремого вихідного буфера для кожної лінії).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Міжнародний Союз Електрозв'язку [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.itu.int. (дата звернення 28.11.2022).

2. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління [Електронний ресурс] Заїка В.Ф., Варфоломеєва О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О. // ДУТ – Режим доступа: http://www.dut.edu.ua/uploads/l_1762_12226724.pdf (дата звернення: 28.11.2022)

3. D.H. Martin, *Communications Satellites 1958–1988*, The Aerospace Corporation, December 31, 1986.

4. L. Jaffe, 'TheNASACommunications Satellite Program Results and Status,'*Proceedings of the 15th International Astronautical Congress*, Vol. 2: Satellite Systems, 2019.

5. J. Alper and J.N. Pelton, eds., 'The INTELSATGlobal System, Progress in Astronautics andAeronautics,'Vol. 93, AIAA, New York, 2020.

6. J. Almond, 'Commercial Communications Satellite Systems in Canada,' *IEEE Communications Magazine*, Vol. 19, No. 1, January 2006.

7. Special Issue onATS 6, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*,Vol. 11, No. 6, November 2009.

8. D.L.Wright and J.W.B. Day, 'The Communications Technology Satellite and the Associated Ground Terminals for Experiments,'*AIAA Conference on Communications Satellites for Health/Education Applications*, July 2011.

9. L.J. Ippolito, 'Characterization of the CTS 12 and 14 GHz Communications Links Preliminary Measurements and Evaluation,' International Conference on Communications: ICC'20, June 2000.

10. Huang C., Liu F. A distributed class-based alternative routing under a congestion control architecture for LEO satellite networks. 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), 2010, pp. 431-435.

11. Na Z., Gao Z., Cui Y., Chen L., Guo Q. Agent-Based Distributed Routing

Algorithm with Traffic Prediction for LEO Satellite Network. International Journal of Future Generation Communication & Networks, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 67-84.

12. Sun W., Zhang Y., Zhang H., Li S. An Optimal Rate Control and Routing Scheme for Multipath Networks. Int. J. of Computers, Communications & Control, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 657-668.

13. Taft-Plotkin N., Bellur B., Ogier R. Quality of Service Routing using Maximally Disjoint Paths. IWQoS '99. 1999 Seventh International Workshop on Quality of Service, 1999, pp. 119-128.

14. Taleb T., Mashimo D., Jamalipour A., Kato N. Explicit Load Balancing Technique for NGEO Satellite IP Networks with On-Board Processing Capabilities. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, vol. 17(1), pp. 281-293.

15. Yoshida K., Tsuru M., Oie Y., Koppen M. Evolutionary Routing-Path Selection in Congested Communication Networks. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2009, pp. 2224-2229.

16. Zhang Z., Nelakutidi S. Optimizing Network Performance Using Weighted Multipath Routing. 21st International conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2012, pp. 1-7.

17. Zhang Z., Nelakutidi S. On Selection of Paths for Multipath Routing. IWQoS 2011, 2011, pp. 170-184.

18. Zhu J., Rao Y., Fu L., Chen W., Shao X. Load Balancing Routing Based on Agent for Polar-orbit LEO Satellite Networks. Journal of Information & Computational Science, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 1373-1384.

19. Zihe G., Qing G., Zhenyu N. A distributed Multipath Routing Strategy for LEO Satellite Networks. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2011, vol. 14, no. 2 pp. 161-169.

20. Hoang L. Tr., Development of Methods to Maintain the Functionality of Wireless Sensor Networks Under Intentional Electromagnetic Interference Conditions. Elektrosvyaz, 2017, no. 3, pp. 32-38.

21. Dao N. Analysis of Routes in the Network Based on a Swarm of Uavs. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, vol. 376, pp. 1261-1271.

22. Taft-Plotkin N., Bellur B., Ogier R. Quality of Service Routing using Maximally Disjoint Paths. IWQoS '99. 1999 Seventh International Workshop on Quality of Service, 1999, pp. 119-128.

23. Tsitsiklis J., Bertsimas D. Simulated Annealing. Statistical Science, 1993, vol. 8, no. 1, pp. 10-15.

24. Pratt S. R. An operational and performance overview of the IRIDIUM low earth orbit satellite system. IEEE Communications Surveys, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 210.

25. Taleb T., Mashimo D., Jamalipour A., Kato N. Explicit Load Balancing Technique for NGEO Satellite IP Networks with On-Board Processing Capabilities. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, vol. 17(1), pp. 281-293.

26. Meng D., Ling Y. A Genetic Optimization Algorithm to Solve the Problem of the Load-Balancing of Network Load. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2016, vol. 6, no. 7B, pp. 63-68.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Презентація по магістерській роботі
на тему:

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

Студента Зозуляка Владислава Володимировича

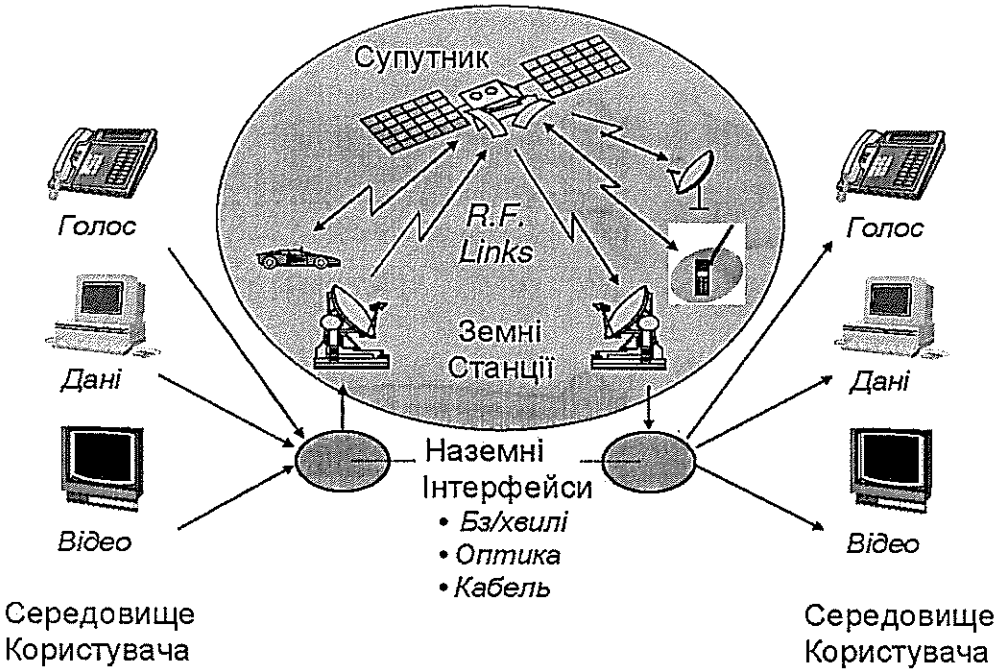
Мета роботи

Мета роботи – розробити алгоритм маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності.

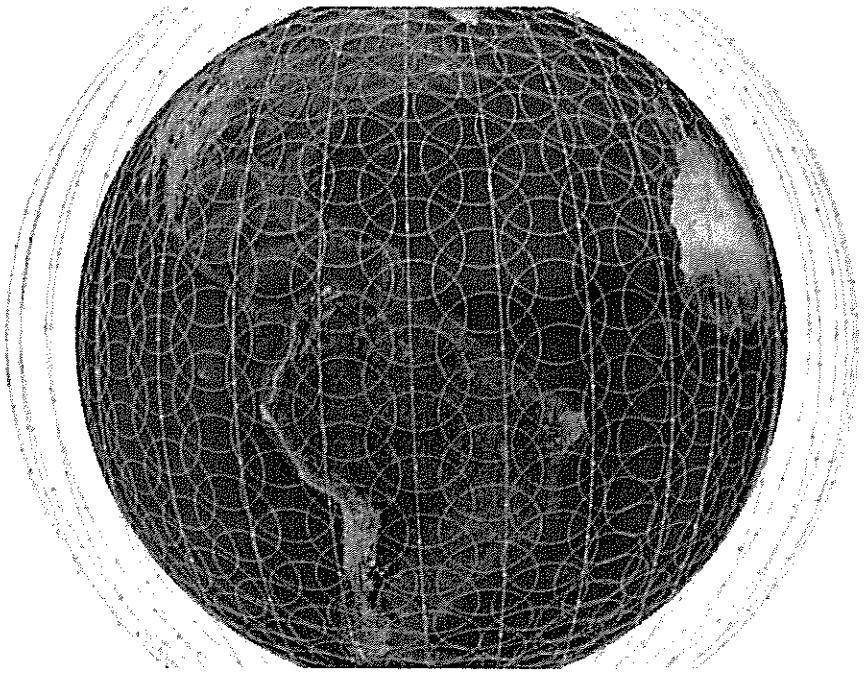
Об'єкт дослідження – процес функціонування супутникових систем зв'язку.

Предмет дослідження – методи збільшення пропускної здатності супутникових систем зв'язку.

Зв'язок за допомогою супутника в телекомунікаційній інфраструктурі



Передача даних в НГССЗ з міжсупутниковими лініями



Алгоритм балансування навантаження. Вхідні дані

1. Граф супутникової системи G = (S, L, C, V), де S - безліч КА, L - безліч ліній, C - швидкість передачі для кожної лінії, V - об'єм буфера для кожної лінії.

2. Безліч обсягів потоків даних за період балансування навантаження в супутниковій системі F = $\{f_{ij}\}$. f_{ij} - об'єм потоку даних від КА i до КА j за період балансування навантаження.

3. Набори маршрутів між кожною парою КА в системі M = $\{m_{ij}\}$.

4. Значення періоду балансування навантаження T.

5. Пропорції розподілу потоків даних між усіма парами КА.

Алгоритм балансування навантаження

1. Розбиваємо кожен потік f_{ij} на безліч підпотоків, кожен з яких йде по маршруту m_{ijk}. Визначаємо обсяги підпотоків, які дорівнюють f_{ijk}. Визначаємо сумарний обсяг потоків даних, що дорівнює сумі обсягів потоків між усіма парами КА $F_\Sigma=\Sigma f_{ij}$.

2. Створюємо безліч N. У цій множині для кожної ліній з L міститься список підпотоків, що проходять через відповідну лінію з L. Щоб отримати безліч N, для кожного підпотоків f_{ijk} проходимо по його маршруту m_{ijk} і додаємо до інформації про відповідну лінії номер нового потоку.

3. За період балансування навантаження T через лінію може пройти обсяг потоків рівний CT, де C - швидкість передачі лінії, а в буфері лінії може накопичитися обсяг потоків, рівний V. Якщо обсяг потоків I, що надійшли буде більше CT+V, то буде втрачено обсяг потоків W=I-(CT+V). I дорівнює сумі обсягів потоків, що проходять через лінію.

4. Визначимо лінії, для яких W > 0. Зберемо ці лінії в безліч O. Якщо безліч O порожньо, то Рпом = 0. Завершуємо роботу алгоритму.

5. У безлічі O визначаємо лінію з найбільшим W, тобто саму перевантажену лінію.

6. Для цієї лінії визначимо, у скільки разів потрібно зменшити інтенсивність підпотоків, що проходять через неї, щоб не відбувалося втрат. Це значення дорівнює K=(CI+V) / I.

7. Візьмемо всі підпотоки, що проходять через цю лінію, і помножимо їх обсяги K.

8. Вилучимо лінію з безлічі перевантажених ліній O.

9. Перераховуємо W для всіх членів O. Якщо W < 0, то видаляємо лінію з безлічі O.

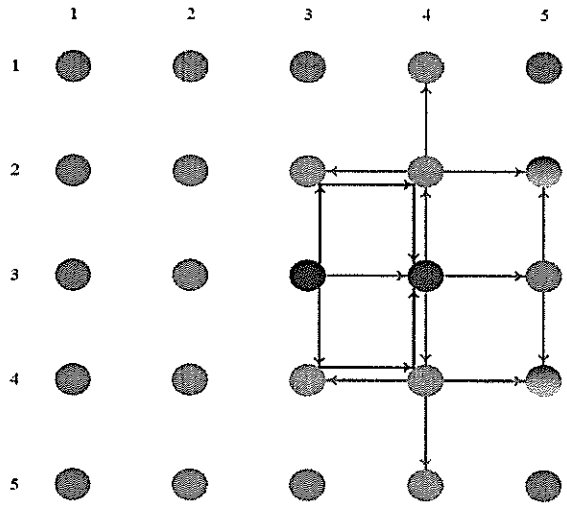
10. Якщо безліч O непорожня, то повертаємося до кроку 5. Якщо порожня, то переходимо до кроку 11.

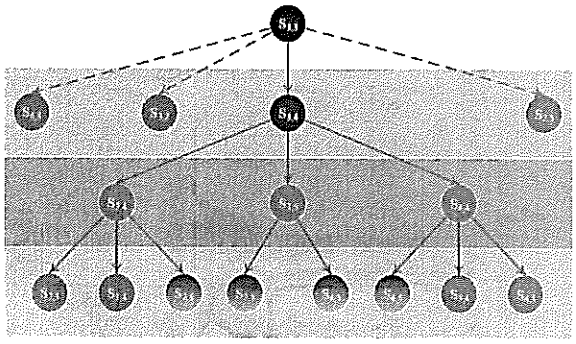
11. Визначаємо заново сумарний обсяг потоків, який дорівнює сумі підпотоків зі зменшеними значеннями їх обсягів $F'_\Sigma=\Sigma f'_{ij}$.

12. Оцінка ймовірності помилки дорівнює Рпом = $(F_\Sigma - F'_\Sigma)/ F_\Sigma$.

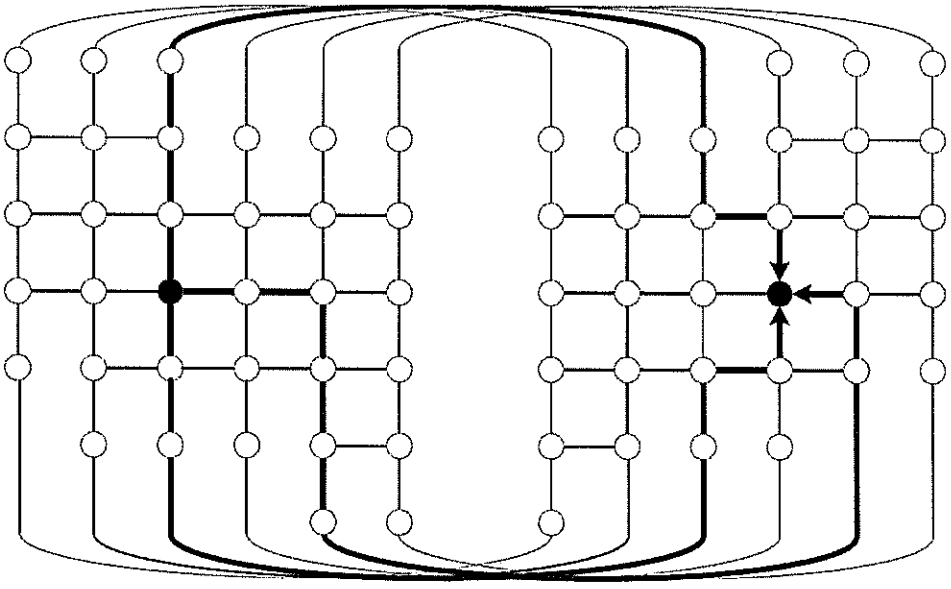
Алгоритм маршрутизації супутникових систем зв’язку

1. Знаходимо маршрути від S_1 до проміжних КА.
2. Знаходимо маршрути від проміжних КА до КА S_2.
3. З'єднуємо відповідні маршрути у множинах M_1 і M_2.
4. Об'єднуємо їх у множину I.

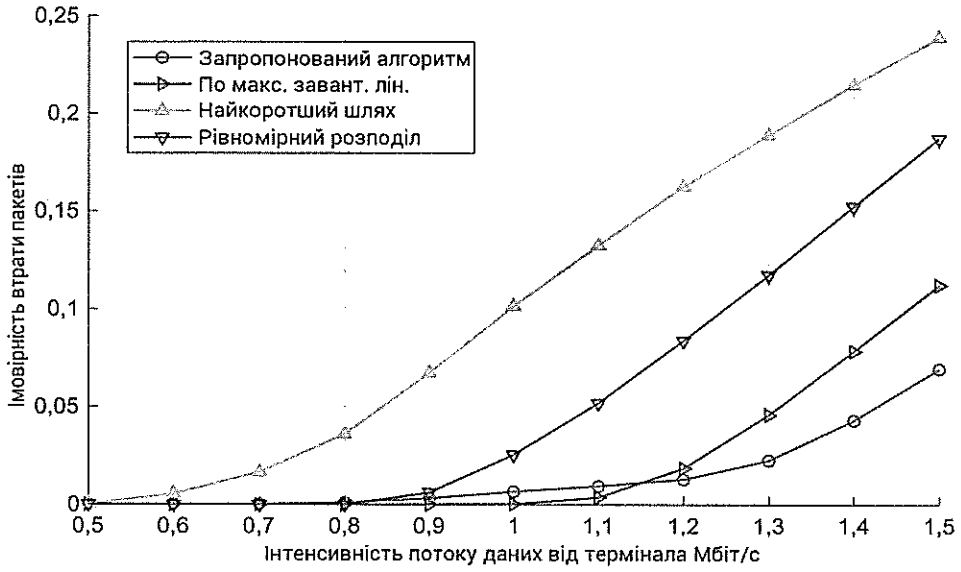




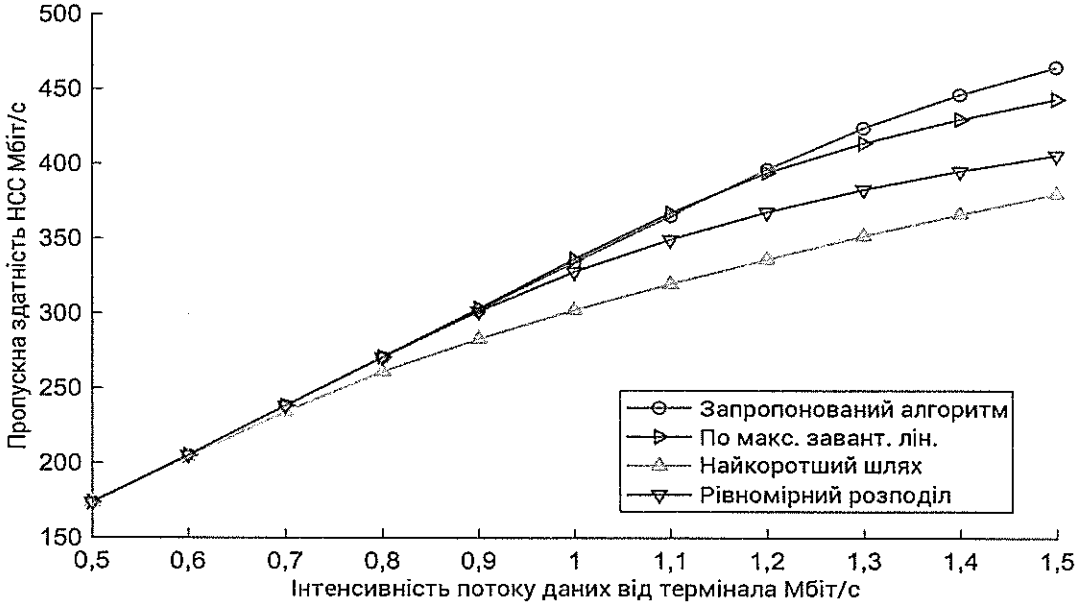
Набір з трьох максимально розрізнених маршрутів



Залежність ймовірності втрати пакетів від інтенсивності потоків даних



Залежність пропускної здатності НСС3 від інтенсивності потоків даних



Висновки

У першому розділі розглянуто технології супутникового зв'язку. Розглянуто наступні питання: початковий етап супутникового зв'язку; основні визначення супутникової системи зв'язку; процес регулювання супутникового зв'язку.

У другому розділі поставлена задача дослідження і виконано розробку алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності. Показано, що пропускна здатність НГССЗ - цінний ресурс. Абоненти розподілені нерівномірно по поверхні Землі. Наслідком цього є нерівномірний розподіл потоків даних між супутниками, що призводить до втрати пакетів даних. Для запобігання втрат пакетів необхідно розробити ефективний алгоритм маршрутизації з балансуванням навантаження, що і виконано.

У третьому розділі виконано імітаційне моделювання дослідження ефективності розробленого алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку. Дослідження показало, що запропонований алгоритм маршрутизації забезпечує низьку ймовірність втрати пакетів при переповненні вихідних буферів міжспутникових ліній і високу пропускну здатність НГССЗ.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на:

- III міжнародній науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУТ, 30 листопада 2022 р.;

- XV науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 9 грудня 2022 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету телекомунікацій, – 2022, – №1".

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Зозуляк В.В. (прізвище та ініціали) до захисту магістерської роботи за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка (шифр і назва спеціальності) на тему: Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____ (підпис) Кравченко В.І. (прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Зозуляк В.В. (прізвище та ініціали) за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій, з 2021 року до 2023 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:
національною шкалою: відмінно 22 %, добре 72 %, задовільно 6 %;
шкалою ECTS: A 22 %; B 33 %; C 39 %; D — %; E 6 %.

Провідний фахівець інституту _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Зозуляк Владислав Володимирович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою в тому числі рекомендаціями МСЕ. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку "відмінно", а студент Зозуляк Владислав Володимирович - присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Керівник роботи _____ (підпис) Макаренко А.О. (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент Зозуляк В.В. (прізвище та ініціали) допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ (підпис) Руденко Н.В. (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Зозуляка Владислава Володимировича

на тему: "Розробка алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності"

Актуальність:

Магістерська робота присвячена дослідженню та розробці алгоритму маршрутизації супутникових систем зв'язку для збільшення їх пропускної здатності. Ефективність використання смуги пропускання каналу зв'язку завжди була актуальним завданням, але її важливість особлива для ССЗ.

Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання інформаційних технологій в даному дослідженні.

Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

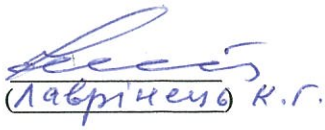
1. В роботі не описано за допомогою яких засобів проведено імітаційне моделювання.

2. На стор. 52 варто уточнити чи запропонована формула є Парето-оптимальною до рівномірно розподілених випадкових величини.

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку "**відмінно**", а студент Зозуляк Владислав Володимирович - присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ та МПТ	√
Має практичну цінність	√
Проект-частина комплексної теми	

Підпис рецензента 

доцент каф. ТСМ (Лаврінець К.Г.)

Підпис засвідчую

Підпис особи, що засвідчує ( )

М.П.