ВСТУП

Актуальність теми. В умовах стрімкої цифровізації сучасного суспільства надійний та високошвидкісний доступ до інформаційних мереж стає базовою потребою. Автомобільна промисловість переживає фундаментальну трансформацію, переходячи від концепції ізольованого транспортного засобу до екосистеми «підключеного автомобіля» (Connected Car). Впровадження технологій автономного водіння, систем допомоги водієві (ADAS), а також сервісів V2X (Vehicle-to-Everything) генерує експоненціальне зростання обсягів даних, які необхідно передавати та обробляти в режимі реального часу.

Традиційні наземні мережі стільникового зв'язку (4G/5G), попри їх активний розвиток, не здатні забезпечити повне та безперервне покриття. "Мертві зони" на швидкісних автомагістралях, у віддалених сільських районах або в умовах складного рельєфу створюють критичні ризики для безпеки руху автономного транспорту та обмежують функціональність навігаційних і мультимедійних систем. У цьому контексті супутниковий зв'язок виступає безальтернативним рішенням для забезпечення глобального покриття та безперервності сервісів .

Особливого імпульсу цій галузі надає розгортання низькоорбітальних супутникових угруповань (LEO), таких як Starlink або OneWeb, які забезпечують низьку затримку сигналу, порівнянну з наземними мережами. Проте ефективне використання цих систем на рухомих об'єктах стримується відсутністю доступних та ефективних абонентських терміналів.

Інтеграція антенних систем в автомобіль пов'язана з низкою складних науково-технічних викликів, які вимагають нових підходів до проєктування:

1. Динамічні умови експлуатації: Висока швидкість руху призводить до виникнення ефекту Доплера, що викликає частотні зсуви та вимагає складних алгоритмів компенсації . Постійна зміна орієнтації автомобіля (повороти, нахили) створює ризик втрати прямої видимості супутника, що вимагає використання антен з електронним керуванням променем або круговою поляризацією.

2. Конструктивні обмеження: Сучасний дизайн автомобілів вимагає прихованого монтажу або використання низькопрофільних антен для збереження аеродинаміки та естетики. Це накладає жорсткі обмеження на габарити та форму випромінювачів.

3. Електромагнітна сумісність та вплив середовища: Металевий кузов автомобіля діє як екран і перевідбивач, створюючи складну інтерференційну картину та зони затінення сигналу. Крім того, антени піддаються впливу агресивних погодних умов, вібрацій та температурних перепадів, що вимагає особливої уваги до вибору матеріалів та стабільності параметрів.

Існуючі рішення часто є компромісними: або занадто громіздкими (механічні параболічні антени), або надмірно дорогими (складні фазовані решітки військового класу). Тому розробка та оптимізація антенних систем, які поєднують високі електродинамічні характеристики (стабільний коефіцієнт підсилення, низький КСХН) з доступністю та можливістю інтеграції в конструкцію масового автомобіля, є актуальним науково-практичним завданням. Вирішення цієї проблеми дозволить підвищити надійність мобільного зв'язку, що є критично важливим для безпеки та комфорту сучасного транспорту.

Метою роботи є підвищення ефективності та надійності супутникового зв'язку в автомобілях шляхом розробки, моделювання та оптимізації конструкції антенної системи з урахуванням динамічних умов експлуатації та впливу конструктивних елементів транспортного засобу.

Об’єкт дослідження — процеси передачі та прийому сигналів супутникового зв'язку в рухомих наземних об'єктах.

Предмет дослідження — методи проєктування, моделювання та оптимізації антенних систем для автомобілів.

1. ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В АВТОМОБІЛЯХ

1.1. Класифікація супутникових систем зв’язку та їх структури

Системи супутникового зв'язку революціонізували спосіб передачі інформації людьми на величезні відстані, сприяючи глобальному зв'язку для телекомунікацій, мовлення, навігації та передачі даних. Ці системи відрізняються своєю класифікацією на основі типів орбіт, структурних конфігурацій та фундаментальних компонентів, кожен з яких адаптований до конкретних експлуатаційних вимог та цілей обслуговування. Розуміння різних типів супутникових систем, їхніх структурних основ та основних компонентів, що входять до їх складу, дає повне уявлення про складну інфраструктуру, яка лежить в основі сучасного супутникового зв'язку. У цьому есе досліджуються ці класифікації та структури, підкреслюючи їх значення у забезпеченні надійних, ефективних та широко розповсюджених комунікаційних можливостей у всьому світі [1].

Системи супутникового зв'язку в основному класифікуються на три категорії залежно від їх орбітальної висоти: геостаціонарні супутникові системи, супутникові системи на низькій навколоземній орбіті (LEO) та супутникові системи на середній навколоземній орбіті (MEO). Геостаціонарні супутники обертаються приблизно на висоті 35 786 кілометрів над екватором, зберігаючи фіксоване положення відносно поверхні Землі, що робить їх ідеальними для безперервного мовлення та стаціонарних каналів зв'язку. Наприклад, багато супутників телевізійного мовлення працюють на цій орбіті, забезпечуючи безперебійне покриття великих географічних районів. На противагу цьому, супутники LEO обертаються набагато ближче до Землі, зазвичай між 500 і 2000 кілометрами, що забезпечує меншу затримку та вищу швидкість передачі даних, що особливо вигідно для застосувань у реальному часі, таких як супутникові телефони та спостереження Землі. Помітним прикладом систем LEO є сузір'я

супутників Starlink від SpaceX, розроблене для забезпечення глобального широкосмугового Інтернету. Супутники MEO займають проміжний діапазон висот, приблизно від 2000 до 35 786 кілометрів, пропонуючи баланс між зоною покриття та затримкою. Такі системи, як сузір'я GPS, працюють на MEO, забезпечуючи точні послуги навігації та визначення часу по всьому світу. Кожен тип системи оптимізовано для конкретних застосувань, балансуючи такі фактори, як затримка, покриття та вартість, а їх розгортання відображає цільові потреби в комунікаційній інфраструктурі (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Класифікація супутникових систем зв’язку та їх структура

Тип супутникової системи	Характеристика	Структурні елементи
GEO (геостаціонарні)	Супутники розташовані над екватором на висоті ~35786 км; забезпечують стабільне покриття.	Наземна станція; супутник; сегмент управління.
MEO (середня орбіта)	Орбіта 2000–20000 км; менші затримки, ніж GEO; використовується навігаційними системами.	Супутники сузір’я; наземний контроль; термінали абонентів.
LEO (низька орбіта)	Висота 500–2000 км; мінімальні затримки; підходить для мобільного та транспортного сектору.	Сузір’я супутників; шлюзові станції; мережевий контроль.
HEO (високоеліптичні)	Асиметрична траєкторія, що забезпечує покриття високих широт.	Супутники на еліптичних орбітах; наземний сегмент; станції моніторингу.

Архітектура систем супутникового зв'язку складається з трьох основних сегментів: космічного сегмента, наземного сегмента та сегмента користувача, кожен з яких відіграє життєво важливу роль у загальній роботі. Космічний сегмент складається з самих супутників, які налаштовані відповідно до вимог їхньої місії. Наприклад, геостаціонарні супутники часто мають кілька транспондерів для забезпечення численних каналів зв'язку, а їх конфігурації можуть варіюватися від установок з одним супутником до великих сузір'їв. Ці супутники оснащені складною бортовою електронікою, включаючи транспондери та антени, що забезпечують прийом, обробку та ретрансляцію сигналів. Наземний сегмент охоплює наземні станції та центри управління, відповідальні за експлуатацію, моніторинг та управління супутниками. Наземні станції оснащені великими антенами з високим коефіцієнтом посилення, які зв'язуються із супутниками, передаючи та приймаючи сигнали, забезпечуючи належне вирівнювання та цілісність сигналу. Центри управління контролюють стан супутників, орбітальні коригування та оновлення системи, часто працюючи цілодобово для підтримки надійності системи. Користувацький сегмент включає пристрої кінцевих користувачів, такі як супутникові антени, термінали та мобільні пристрої, які підключають користувачів до супутникової мережі. Ці користувацькі термінали розроблені як портативні або стаціонарні, залежно від застосування, і мають вирішальне значення для поєднання супутникової інфраструктури з послугами кінцевих користувачів, забезпечуючи безперебійний доступ до каналів зв'язку в різних середовищах.

Функціональність та ефективність систем супутникового зв'язку залежать від кількох ключових компонентів, кожен з яких виконує спеціалізовані ролі в системі. Транспондери – це основні електронні модулі на борту супутників, що відповідають за прийом вхідних сигналів від наземних станцій або користувацьких терміналів, підсилення або перетворення цих сигналів та їх ретрансляцію у визначені зони. Їхня здатність одночасно обробляти кілька каналів має вирішальне значення для підтримки високопродуктивної передачі даних та різноманітних послуг. Антени, невід'ємна частина як космічного, так і наземного

сегментів, бувають різних типів, таких як параболічні, спіральні або фазовані антени, кожна з яких підходить для певних застосувань. Наприклад, великі параболічні антени часто використовуються на наземних станціях для зв'язку на великі відстані з високим коефіцієнтом посилення, тоді як електронно керовані фазовані антени можуть динамічно відстежувати супутники в режимі реального часу, підвищуючи стабільність зв'язку. Блоки живлення є важливими для підтримки роботи супутників, забезпечуючи необхідну енергію для роботи транспондерів, антен та бортових систем. Ці блоки часто включають сонячні панелі та акумуляторні батареї, призначені для забезпечення стабільної роботи навіть під час періодів затемнення або високого енергоспоживання. Надійність та стійкість цих компонентів є життєво важливими для підтримки безперервних високоякісних каналів зв'язку, що робить їх основою інфраструктури супутникового зв'язку (рис. 1.1) [2].

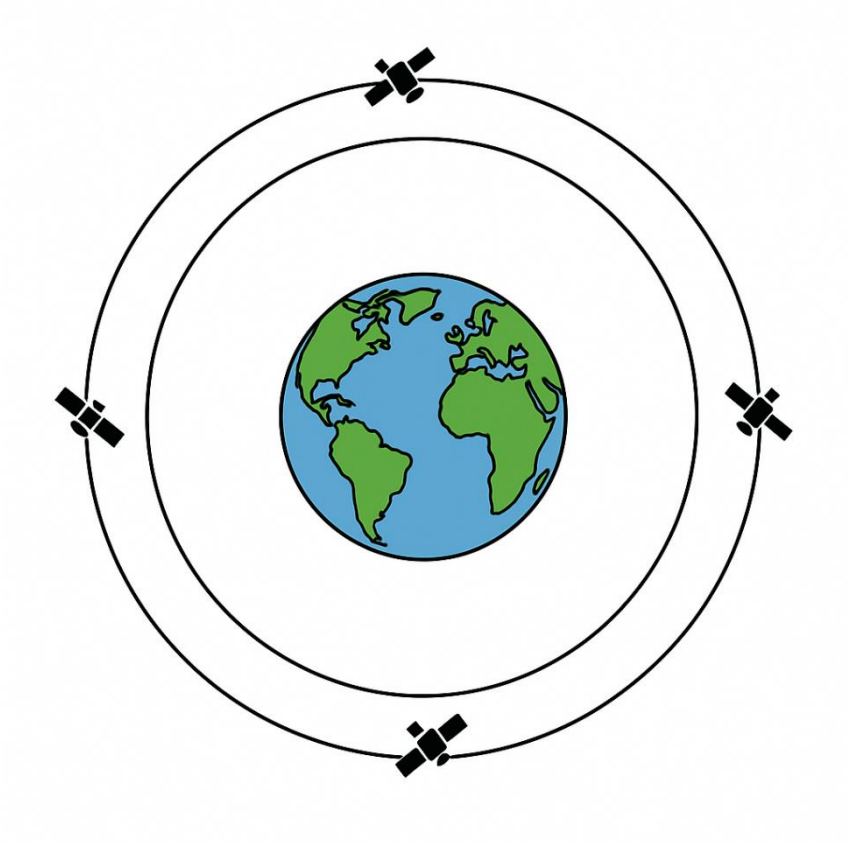


Рис. 1.1. Земля та орбіти супутників різних типів

Системи супутникового зв'язку також можна класифікувати відповідно до їхніх конкретних функцій та операційних ролей, що адаптує їхню конструкцію та розгортання до конкретних вимог до послуг. Фіксовані супутникові системи в першу чергу призначені для забезпечення стабільних та безперервних послуг зв'язку, таких як телевізійне мовлення та широкосмуговий інтернет, до фіксованих місць розташування. Ці системи зазвичай використовують геостаціонарні супутники, які забезпечують стабільне покриття великих географічних районів, що робить їх ідеальними для засобів масової інформації та стабільної передачі даних. Мобільні супутникові системи, з іншого боку, обслуговують користувачів, яким потрібне з'єднання під час руху, включаючи морські судна, літаки та мобільних наземних користувачів. Ці системи часто використовують супутники на низькоорбітних або середньоорбітних орбітах (LEO) для мінімізації затримки та забезпечення зв'язку в режимі реального часу, зі складними можливостями відстеження та передачі передачі для підтримки зв'язку під час руху. Прикладом є супутникова мережа Inmarsat, призначена для підтримки морського та авіаційного зв'язку. Нарешті, системи супутникового мовлення спеціалізуються на передачі великих обсягів медіаконтенту на великі регіони, що сприяє масштабному телевізійному та радіомовленню. Ці системи використовують геостаціонарні супутники високої потужності, оснащені кількома транспондерами, для ефективної доставки високоякісних медіапотоків мільйонам глядачів. Ця класифікація підкреслює, як супутникові системи оптимізовані для різних операційних потреб, зумовлених характером їхньої бази користувачів та цілями обслуговування, відповідно формуючи їхні структурні та технологічні конфігурації.

Майбутнє супутникового зв'язку характеризується інноваційними структурними розробками, спрямованими на розширення покриття, пропускної здатності та гнучкості. Однією з помітних тенденцій є розгортання сузір'їв малих супутників, таких як CubeSat, які є компактними, економічно ефективними пристроями, що можуть бути запущені у великій кількості для створення динамічних, масштабованих мереж. Ці малі супутникові сузір'я особливо

підходять для спостереження за Землею, моніторингу навколишнього середовища та розширення глобального доступу до Інтернету, особливо у віддалених або недостатньо обслуговуваних регіонах. Крім того, гібридні системи, що поєднують геостаціонарні (GEO) та низькоорбітальні (LEO) супутники, стають потужним підходом до використання сильних сторін обох типів орбіт – широкого покриття GEO та низької затримки LEO – створюючи більш універсальні та стійкі комунікаційні мережі. Наприклад, такі гібридні архітектури можуть оптимізувати доставку даних, маршрутизуючи трафік через найбільш підходящі супутники на основі місцезнаходження та вимог до обслуговування. Досягнення в технології багаторазового використання супутників, прикладом яких є програма SpaceX Starship, також суттєво впливають на структурні міркування. Можливість багаторазового використання знижує витрати на запуск та дозволяє швидко розгортати та замінювати компоненти супутників, що призводить до більш адаптивної та стійкої інфраструктури. Ці нові конфігурації та технологічні інновації готові трансформувати структурний ландшафт систем супутникового зв'язку, зробивши їх більш ефективними, гнучкими та доступними для широкого кола застосувань [3].

На завершення, системи супутникового зв'язку охоплюють широкий спектр класифікацій, заснованих на типах орбіт, структурних конфігураціях, компонентах, функціональності та нових інноваціях. Геостаціонарні, низькоорбітальні та середньоорбітальні супутники виконують різні ролі, від безперервного мовлення до інтернету з низькою затримкою, кожен з яких має індивідуальні структурні налаштування, що включають супутники, наземні станції та термінали користувача. Такі компоненти, як транспондери, антени та джерела живлення, утворюють основу цих систем, забезпечуючи їхню експлуатаційну надійність та ефективність. Функціонально супутники призначені для фіксованих, мобільних або мовних послуг, що відображають конкретні потреби користувачів та цілі обслуговування. З розвитком технологій нові структурні парадигми, такі як малі супутникові сузір'я, гібридні системи та багаторазові супутникові платформи, революціонізують архітектуру супутників,

обіцяючи більш гнучкі, економічно ефективні та глобально охоплюючі комунікаційні мережі. Разом ці класифікації та інновації підкреслюють динамічну еволюцію систем супутникового зв'язку, які продовжують відігравати життєво важливу роль у сприянні глобальному зв'язку та технологічному прогресу.

1.2. Робочі частотні діапазони супутникових систем та вимоги до антен

Системи супутникового зв'язку працюють у широкому спектрі електромагнітних частот, кожна з яких адаптована до конкретних застосувань та експлуатаційних вимог. Вибір робочих діапазонів частот суттєво впливає на конструкцію, продуктивність та вартість системи. Ці діапазони частот класифікуються на різні смуги, такі як L, S, C, X, Ku, Ka, V та Q/V, кожна з яких має відмінні характеристики, що роблять їх придатними для різних супутникових служб. Розуміння нюансів цих смуг частот, їх типових діапазонів та факторів, що впливають на їх вибір, є важливим для проектування ефективних ліній супутникового зв'язку. Крім того, антенні системи, що використовуються для передачі та прийому сигналів, повинні бути належним чином узгоджені з їхніми робочими частотами, що впливає на їхній розмір, конструкцію та загальну продуктивність. У цьому есе досліджуються робочі діапазони частот супутникових систем, вимоги до антен на різних частотах та те, як вибір частоти впливає на продуктивність зв'язку.

Електромагнітний спектр, виділений для супутникового зв'язку, сегментований на кілька частотних діапазонів, кожен з яких має специфічні застосування та характеристики. Нижчі частотні діапазони, такі як L (1-2 ГГц) та S (2-4 ГГц), відомі своїм відносно низьким атмосферним затуханням, що робить їх придатними для мобільних супутникових служб, GPS та моніторингу погоди. Наприклад, частоти L-діапазону зазвичай використовуються в системах GPS-навігації, оскільки вони можуть ефективно проникати крізь густу рослинність та міське середовище. C-діапазон (4-8 ГГц) широко використовується для телевізійного мовлення та фіксованих супутникових служб завдяки збалансованому компромісу між пропускною здатністю та стійкістю атмосфери. Вищі частотні діапазони, такі як Ku (12-18 ГГц) та Ka (26,5-40 ГГц), пропонують більшу пропускну здатність, придатну для широкосмугового Інтернету та телебачення високої чіткості, але вони більш схильні до згасання від дощу та атмосферного затухання. V-діапазон (40-75 ГГц) та Q/V-діапазони (33-50 ГГц)

з'являються для надшвидкісних каналів передачі даних та передових наукових застосувань завдяки їхній широкій доступній пропускній здатності, хоча вони вимагають складних технологій для зменшення проблем поширення (табл. 1.2) [4].

Таблиця 1.2.

Робочі частотні діапазони супутникових систем та вимоги до антен

Діапазон	Частоти	Характеристика	Вимоги до антени
L-діапазон	1–2 ГГц	Стійкість до атмосферних впливів, застосовується для мобільного транспорту.	Широконаправлені антени, компактність, стабільність при русі.
S-діапазон	2–4 ГГц	Збалансоване співвідношення пропускної здатності та стійкості сигналу.	Середньонаправлені антени, помірні вимоги до точності наведення.
Ku-діапазон	12–18 ГГц	Висока пропускна здатність, чутливість до дощу.	Антени з високою точністю спрямування, низькопрофільні автомобільні рішення.
Ka-діапазон	26–40 ГГц	Надвисокі швидкості, сильний вплив атмосферних умов.	Фазовані антени, точні системи стабілізації та трекінгу супутника.

Вибір конкретного діапазону залежить від кількох факторів: бажаної швидкості передачі даних, зони покриття, атмосферних умов та доступних технологій. Наприклад, діапазони Ku та Ka часто обираються для супутникових інтернет-послуг, де висока пропускна здатність є важливою, незважаючи на їхню вразливість до погодних збоїв, які необхідно пом'якшувати за допомогою бюджетування каналів зв'язку та адаптивних методів.

Вимоги до антен значно відрізняються в різних діапазонах частот супутників, головним чином через довжину хвилі та пов'язані з нею характеристики поширення. Вищі діапазони частот, такі як Ku та Ka, вимагають менших розмірів антен через їх коротші довжини хвиль; наприклад, типова параболічна антена для Ku-діапазону може мати діаметр близько 1-2 метрів, що забезпечує достатнє посилення для надійного зв'язку. І навпаки, системи нижчих частот, такі як L та S-діапазони, вимагають більших антен — іноді понад 10 метрів — для досягнення порівнянних рівнів посилення, оскільки їхні довші довжини хвиль призводять до нижчої спрямованості антени. Тип використовуваної антени також залежить від робочої частоти. Параболічні антени поширені у високочастотних системах завдяки їх високому посиленню та спрямованості, що є важливим для з'єднань "точка-точка". Фазовані антенні решітки, які електронно спрямовують промені без рухомих частин, набувають дедалі більшої популярності в V-діапазонах та Q/V-діапазонах завдяки своїй гнучкості та придатності для роботи в умовах швидкої зміни середовища. Спіральні антени часто використовуються в L-діапазоні для мобільних супутникових служб завдяки їхнім можливостям кругової поляризації, що допомагає зменшити невідповідності поляризації під час відстеження супутників. Схеми поляризації, такі як лінійна або кругова поляризація, вибираються залежно від застосування, щоб максимізувати цілісність сигналу, зменшити перешкоди та покращити якість зв'язку. Крім того, критично важливим є врахування ширини променя; вужчі промені зменшують перешкоди та покращують співвідношення сигнал/шум, але вимагають точного націлювання, особливо у високочастотних системах, де навіть незначні невідповідності можуть погіршити продуктивність.

Діапазон частот, обраний для супутникового зв'язку, безпосередньо впливає на поширення сигналу та загальну продуктивність системи. Вищі частоти, такі як Ka та V-діапазони, характеризуються більшими втратами на трасі у вільному просторі, що вимагає антен з високим коефіцієнтом посилення та складного підсилення для підтримки надійного зв'язку. Атмосферні явища, такі як дощ і туман, також мають більш виражений вплив на цих частотах, що призводить до

ослаблення сигналу — зазвичай званого загасанням під час дощу — що вимагає таких стратегій, як використання малошумних підсилювачів (LNA), схем рознесення та адаптивної модуляції для збереження якості зв'язку. Натомість, нижчі частотні діапазони, такі як L та S, менше зазнають впливу атмосферних перешкод, пропонуючи стабільніші зв'язки, але за рахунок ширших розмірів антен та меншої пропускної здатності. Щоб протидіяти цим проблемам, інженери використовують передові методи, такі як адаптивне формування променя, яке динамічно налаштовує діаграми спрямованості антен для оптимізації сили сигналу та зменшення перешкод. Розрахунки бюджету зв'язку враховують ці фактори, балансуючи передану потужність, коефіцієнт посилення антени, втрати у вільному просторі та атмосферні умови для забезпечення надійного зв'язку. Наприклад, розгортання малошумних підсилювачів на приймачі підвищує чутливість, особливо у високочастотних системах, де сигнали слабкі через атмосферне ослаблення. Крім того, розробка стратегій повторного використання частоти та кодування з корекцією помилок була життєво важливою для максимізації пропускної здатності та надійності супутникових ліній зв'язку в різних частотних діапазонах, забезпечуючи стабільну роботу навіть за несприятливих умов [5].

Останні технологічні досягнення суттєво вплинули на конструкцію та вимоги до супутникових антен, особливо враховуючи рух галузі до Вищі частотні діапазони. Розробка компактних антен з високим коефіцієнтом посилення стала революційним кроком, дозволяючи ефективніше використовувати доступний спектр, одночасно зменшуючи фізичний розмір корисного навантаження супутників. Наприклад, сучасні параболічні антени тепер використовують інноваційні матеріали та точні технології виробництва для досягнення більших можливостей фокусування на менших площах. Крім того, поява адаптивних та електронно керованих антен, таких як фазовані решітки, зробила революцію в гнучкості покриття. Ці антени можуть динамічно регулювати свої діаграми спрямованості без фізичного руху, дозволяючи супутникам орієнтуватися на певні області, адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища або

відстежувати кілька наземних станцій одночасно. Ця технологія не тільки підвищує надійність системи, але й знижує експлуатаційні витрати, усуваючи механічні системи керування. Крім того, інтеграція антенних систем безпосередньо в корисне навантаження супутників стає все більш складною, що сприяє створенню багатоцільових та реконфігурованих архітектур супутників. Така інтеграція дозволяє швидко адаптуватися до потреб у послугах, що змінюються, покращувати формування променя та ефективно використовувати спектр. В результаті, оператори супутників тепер можуть пропонувати більш універсальні, високопродуктивні послуги зв'язку, підтримуючи зростаючий попит на широкосмугове підключення, додатки Інтернету речей та наукові дослідження, навіть у складних умовах. Заглядаючи в майбутнє, майбутнє діапазонів частот супутникових систем та антенних технологій готове до швидкої еволюції на тлі нових тенденцій та постійних викликів. Нові діапазони частот, такі як V-діапазон та Q/V-діапазон, привертають увагу супутникових служб наступного покоління завдяки своїй широкій доступній пропускній здатності, перспективним надвисоким швидкостям передачі даних та підвищеній ємності. Ці діапазони особливо привабливі для таких застосувань, як потокове передавання високої чіткості, глобальне покриття Інтернетом та збір наукових даних. Однак робота на цих вищих частотах створює значні проблеми, включаючи підвищене атмосферне ослаблення, особливо від дощу та вологості, а також підвищену складність апаратного забезпечення. Делікатна природа високочастотних компонентів вимагає передових матеріалів, точного виготовлення та більш складних методів обробки сигналів для зменшення втрат на поширення та деградації апаратного забезпечення. Для вирішення цих проблем постійні інновації зосереджені на мініатюризації антен та розробці нових матеріалів, таких як метаматеріали та легкі композити, які можуть забезпечити створення менших та ефективніших антен, здатних надійно працювати в цих діапазонах. Крім того, дослідження інноваційних систем охолодження, адаптивних алгоритмів формування променя та стійкого апаратного забезпечення мають вирішальне значення для подолання екологічних та технічних перешкод. У міру розвитку цих досягнень вони

сприятимуть ширшому впровадженню високочастотних систем супутникового зв'язку, прокладаючи шлях для більш пов'язаної та технологічно складної супутникової інфраструктури.

Підсумовуючи, робочі діапазони частот супутникових систем різноманітні, від L-діапазону до нових V та Q/V діапазонів, кожен з яких адаптований до конкретних застосувань та екологічних міркувань. Вибір частоти суттєво впливає на вимоги до антен, впливаючи на їх розмір, тип, поляризацію та ширину променя, що є критично важливим для досягнення оптимальної передачі та прийому сигналу. Технологічний прогрес сприяв розробці високочастотних, компактних та електронно керованих антен, що забезпечує більшу гнучкість, ефективність та інтеграцію в корисні навантаження супутників. Дивлячись у майбутнє, галузь стикається як із захопливими можливостями, так і з серйозними викликами, оскільки вона виходить на вищі частотні діапазони, які обіцяють збільшення ємності, але вимагають інноваційних рішень для управління атмосферним ослабленням та складністю апаратного забезпечення. Постійні дослідження та технологічні інновації в матеріалах, конструкції антен та адаптивних системах будуть життєво важливими для подолання цих перешкод та розкриття повного потенціалу майбутніх мереж супутникового зв'язку. Загалом, динамічна взаємодія між вибором частоти та технологією антен залишається центральною для розвитку можливостей супутникового зв'язку, забезпечуючи стійку, високопродуктивну та універсальну глобальну зв'язок у найближчі роки.

1.3. Вплив умов експлуатації автомобіля на параметри супутникового радіоканалу

Супутникове радіо стало невід'ємною частиною сучасних автомобільних розважальних та комунікаційних систем, пропонуючи широкий спектр каналів та високоякісний аудіоконтент. Однак надійність та чіткість сигналів супутникового радіо залежать не лише від супутникової інфраструктури, але й суттєво залежать від умов експлуатації самого транспортного засобу. Ці умови охоплюють такі

фактори, як швидкість транспортного засобу, орієнтація, позиціонування та конструкційні матеріали, всі з яких можуть змінювати поширення супутникових сигналів та впливати на загальний досвід користувача. Розуміння того, як ці змінні впливають на параметри каналів супутникового радіо, є важливим для оптимізації проектування системи та забезпечення стабільної якості сигналу в різних транспортних середовищах. У цьому есе досліджується багатогранний вплив умов експлуатації транспортного засобу на продуктивність супутникового радіо, зосереджуючись на впливі швидкості, орієнтації та позиціонування, а також конструкційних матеріалів на цілісність сигналу [6].

Одним з основних факторів, що впливають на якість сигналу супутникового радіо, є швидкість транспортного засобу, яка безпосередньо впливає на доплерівський зсув — явище, коли частота хвилі змінюється через відносний рух між джерелом сигналу та приймачем. Зі збільшенням швидкості транспортного засобу, особливо вище типових міських швидкостей, ефект Доплера стає більш вираженим, що призводить до зсуву частоти прийнятого сигналу від початкової частоти передачі (рис. 1.3). Цей зсув може призвести до таких проблем, як спотворення сигналу, згасання або тимчасова втрата, особливо під час швидкого розгону або уповільнення. Наприклад, на швидкостях понад 100 км/год доплерівський зсув частоти може досягати кількох кілогерц, що змушує алгоритми приймача швидко компенсувати це для підтримки точності звуку. Швидкий рух також призводить до постійних змін видимого положення супутника відносно транспортного засобу, що призводить до коливань сили та стабільності супутникового сигналу. Ці часті коливання можуть призвести до переривань аудіопотоку, зниження співвідношення сигнал/шум та збільшення частоти помилок під час декодування даних. Відповідно, високошвидкісні сценарії, такі як рух по автомагістралях, вимагають більш надійних методів обробки сигналів та адаптивних алгоритмів для пом'якшення негативного впливу доплерівських зсувів, забезпечуючи безперебійний прийом супутникового радіо в динамічних умовах.

Фізична орієнтація та розташування транспортного засобу відіграють вирішальну роль у визначенні якості та надійності сигналів супутникового радіо. нтени, встановлені на транспортних засобах, зазвичай є спрямованими та потребують належного вирівнювання з положенням супутника в небі для оптимізації прийому сигналу.

Таблиця 1.3.

Вплив умов експлуатації автомобіля на параметри супутникового радіоканалу

Параметр	Характеристика	Вплив на супутниковий радіоканал
Швидкість руху автомобіля	Зміна положення антени відносно супутника під час руху.	Викликає коливання рівня сигналу, потребує стабілізації та корекції трекінгу.
Повороти та нахили кузова	Динамічні зміни орієнтації автомобіля.	Порушення напрямленості антени, погіршення якості прийому/передачі.
Метеорологічні умови	Дощ, сніг, туман, вологість.	Послаблення сигналу (особливо у Ku/Ka), збільшення втрат та перешкод.
Екранування елементами автомобіля	Антена частково закрита кузовом або елементами конструкції.	Зниження коефіцієнта підсилення, додаткові відбиття та стоячі хвилі.

Коли транспортний засіб змінює свою орієнтацію, наприклад, під час поворотів, зміни смуги руху або паркувальних маневрів, вирівнювання антени відносно супутника зміщується, що потенційно може зменшити силу сигналу або спричинити періодичні проблеми з прийомом. Наприклад, антена, встановлена на даху, яка спрямована вгору, може бути зміщена, коли транспортний засіб різко нахиляється або повертає, що призводить до зниження чіткості прямої видимості.

Крім того, зовнішні перешкоди, такі як високі будівлі, мости або природні особливості рельєфу, можуть перешкоджати прямої видимості супутника, що призводить до ослаблення сигналу або повної втрати прийому, особливо в міських умовах з щільною інфраструктурою. Усередині автомобіля такі компоненти, як вікна з металевими покриттями, конструкції приладової панелі та електронні пристрої, можуть спричиняти багатопроменеві відбиття, коли сигнали відбиваються від поверхонь і досягають антени з фазовими різницями, що призводить до конструктивних або деструктивних перешкод. Такі ефекти багатопроменевості можуть спричиняти коливання якості сигналу, що призводить до спотворень або провалів звуку. Загалом, оптимальне розміщення та орієнтація антен, а також стратегічні міркування щодо дизайну інтер'єру, є важливими для мінімізації цих негативних наслідків та забезпечення стабільних каналів супутникового радіо.

Матеріали, що використовуються в конструкції автомобіля, суттєво впливають на поширення супутникових сигналів. Металеві та композитні матеріали в кузові автомобіля можуть відбивати або поглинати радіочастотні сигнали, тим самим послаблюючи силу прийнятого сигналу. Наприклад, автомобілі з металевими дахами або панелями схильні створювати тіньові зони, де сигнали або відбиваються, або значно послаблюються, що може призвести до нестабільного прийому за певних умов руху або місць. Аналогічно, використання передових матеріалів, таких як вуглецеві волокнисті композити, в конструкції автомобілів, хоча й корисне для зниження ваги та безпеки, може перешкоджати передачі супутникового сигналу через свої провідні властивості. Вікна з тонованими плівками, покриттями або металевими шарами ще більше сприяють погіршенню сигналу. Тонування вікон, просочене металевими частинками, відбиває або поглинає частину супутникових сигналів, зменшуючи ефективну потужність сигналу, що досягає антени. Цей ефект особливо виражений в автомобілях із сильно тонованими вікнами, де ослаблення сигналу може бути настільки суттєвим, що спричиняє помітне падіння якості звуку або його втрату. Вибір структурної конструкції, такий як розміщення антен та вибір матеріалів на

даху та панелях кузова автомобіля, критично впливає на загальну силу сигналу. Використання матеріалів з мінімальними радіочастотними перешкодами та оптимізація розміщення антени може значно покращити прийом супутникового сигналу, забезпечуючи чіткіші канали та менше перебоїв незалежно від структурної конструкції автомобіля.

Фактори навколишнього середовища в навколишній атмосфері та місцевості суттєво впливають на якість та стабільність супутникових радіосигналів, що приймаються всередині автомобіля. Погодні явища, такі як дощ, сніг та туман, відомі тим, що викликають ослаблення сигналу, процес, коли переданий сигнал послаблюється, проходячи через ці атмосферні умови. Зокрема, сильні опади можуть призвести до явища, відомого як згасання сигналу під дією дощу, коли частинки води поглинають та розсіюють радіочастотні сигнали, що призводить до зниження сили сигналу та потенційних провалів звуку. Накопичення снігу на зовнішніх поверхнях може аналогічним чином погіршити якість сигналу, особливо якщо сніг або лід загороджують лінію видимості антени. Туман з його щільною водяною парою вносить фазові зрушення – незначні зміни фази хвилі, які можуть спричиняти перешкоди та шум у прийнятому сигналі [7].

Ці атмосферні збурення додають шар непередбачуваності до супутникового зв'язку, часто вимагаючи вдосконалених алгоритмів корекції помилок та методів обробки сигналів для підтримки чіткості звуку. Міське середовище створює додаткові проблеми через так званий ефект «міського каньйону», де високі будівлі та вузькі вулиці відбивають, дифрактують та поглинають сигнали. Таке багатопроменеве поширення призводить до того, що кілька шляхів сигналу надходять до приймача з різними затримками та фазовими різницями, що викликає конструктивні та деструктивні перешкоди. Отже, сигнали можуть швидко зникати або коливатися, ускладнюючи здатність приймача підтримувати стабільне з'єднання. Розуміння цих впливів на навколишнє середовище є життєво важливим для проектування стійких систем супутникового радіо, які можуть адаптуватися до різних погодних умов та умов місцевості, забезпечуючи стабільний користувацький досвід у різних середовищах. Критичним фактором у

пом'якшенні негативного впливу умов експлуатації транспортного засобу на сигнали супутникового радіо є конструкція та розміщення антенної системи транспортного засобу. Вибір типу антени, такого як всеспрямована, спрямована або фазована решітчаста, безпосередньо впливає на якість та надійність прийому сигналу. Всеспрямовані антени, які приймають сигнали однаково з усіх напрямків, є вигідними для загального використання, особливо в середовищах, де орієнтація транспортного засобу часто змінюється. І навпаки, спрямовані антени з вищим коефіцієнтом посилення фокусують прийом на супутнику, покращуючи силу сигналу, але вимагаючи точного вирівнювання. Коефіцієнт посилення антени визначає її здатність збирати слабкі сигнали; антени з вищим коефіцієнтом посилення можуть краще компенсувати втрату сигналу через конструкційні матеріали або умови навколишнього середовища. Правильне розміщення не менш важливе; антени, встановлені на даху або піднятих місцях, зазвичай мають чіткішу лінію видимості для супутників, мінімізуючи перешкоди та ефекти багатопроменевості. Розташування антени подалі від металевих або електронних джерел перешкод у салоні транспортного засобу зменшує погіршення сигналу та відбиття. Крім того, сучасні адаптивні антенні системи включають інтелектуальні технології, які можуть електронно керувати або коригувати свій фокус на основі умов у режимі реального часу, таких як рух транспортного засобу або зміни навколишнього середовища. Ці системи можуть динамічно оптимізувати прийом, компенсуючи доплерівські зрушення, перешкоди або багатопроменеві перешкоди, тим самим підтримуючи високоякісний супутниковий зв'язок навіть під час різких змін швидкості або складних умов. Таким чином, продуманий дизайн антени та її стратегічне розташування є важливими компонентами надійної системи супутникового радіо, здатної забезпечувати стабільний високоякісний аудіоконтент незалежно від умов експлуатації транспортного засобу.

На завершення, на продуктивність каналів супутникового радіо в транспортних засобах суттєво впливає безліч умов експлуатації. Швидкість транспортного засобу призводить до доплерівських зсувів та коливань стабільності сигналу, що вимагає вдосконаленої обробки для забезпечення

безперебійного прийому. Орієнтація та розташування транспортного засобу, разом із зовнішніми перешкодами та внутрішніми компонентами, впливають на вирівнювання антени та викликають ефекти багатопроменевості, які можуть спотворювати сигнали. Конструкційні матеріали, такі як метал та тоновані вікна, ще більше послаблюють сигнали, що підкреслює важливість продуманого проектування транспортного засобу та вибору матеріалів. Умови навколишнього середовища, включаючи несприятливі погодні умови та міську місцевість, додають додаткові рівні складності, викликаючи ослаблення, фазові зсуви та багатопроменеві перешкоди, що ставить під загрозу цілісність сигналу. Нарешті, проектування та розміщення антен відіграють ключову роль в оптимізації прийому; висококорисні, стратегічно розташовані та адаптивні антенні системи можуть значно зменшити багато з цих проблем. У сукупності розуміння та врахування цих факторів є важливим для покращення продуктивності супутникового радіо, забезпечення надійних, високоякісних аудіорозваг для користувачів у різних транспортних середовищах. З розвитком технологій інтеграція розумніших антенних систем та стійкої обробки сигналів буде ключем до подолання динамічних проблем, що виникають в умовах експлуатації, що зрештою забезпечить більш стабільний та приємний досвід супутникового радіо.

1.4. Типи антен для супутникового зв’язку та особливості їх використання в автомобілях

Супутниковий зв'язок став невід'ємним аспектом сучасного зв'язку, забезпечуючи надійний обмін даними на величезних відстанях та в різноманітних середовищах. Ефективність систем супутникового зв'язку значною мірою залежить від типу використовуваних антен, які призначені для оптимізації передачі та прийому сигналу на основі конкретних експлуатаційних потреб. У транспортних засобах, зокрема в автомобілях, вибір технології антени має вирішальне значення для забезпечення стабільного та високоякісного зв'язку навіть у складних умовах, таких як висока мобільність та змінна орієнтація. У

цьому есе досліджуються три основні типи антен, що використовуються в супутниковому зв'язку: параболічні антени, мікросмужкові патч-антени та спіральні антени. Кожен тип пропонує різні характеристики та переваги, що роблять їх придатними для різних застосувань, з особливим акцентом на їх використанні в автомобільних умовах (рис. 1.4) [8].

Таблиця 1.4.

Типи антен для супутникового зв’язку та особливості їх використання в автомобілях

Тип антени	Характеристика	Переваги	Особливості використання в автомобілях
Параболічна антена	Класична антена з високою спрямованістю та великим підсиленням.	Максимальна точність спрямування, високий рівень сигналу.	Потребує механічного трекінгу; малопридатна для високих швидкостей руху.
Фазована решітка (Phased Array)	Антена з електронним скануванням променя.	Швидке переналаштування, висока стабільність при русі.	Найкращий варіант для автомобілів; дорожча конструкція.
Плоска панельна антена	Компактна конструкція з обмеженою спрямованістю.	Низький профіль, проста інтеграція.	Середня ефективність; підходить для L/S діапазонів.
Спіральна антена	Широкосмугова антена з круговою поляризацією.	Добра стійкість до поворотів автомобіля, простота.	Підходить для мобільних систем, але має нижчий коефіцієнт підсилення.

Параболічні антени характеризуються великими тарілкоподібними відбивачами, які служать для фокусування радіочастотних сигналів у вузький,

високо спрямований промінь. Така конструкція забезпечує високий коефіцієнт посилення та спрямованості, що є важливим для встановлення супутникових зв'язків на великі відстані з мінімальними втратами сигналу. Вигнута поверхня антени діє як відбивач, концентруючи вхідні сигнали на центральний рупор або передаючи сигнали назовні з сфокусованою точністю. Такі антени зазвичай використовуються на наземних станціях та великих супутникових антенах, оскільки їхня міцна конструкція забезпечує високоякісні, стабільні зв'язки на сотні або тисячі кілометрів. При адаптації для використання в транспортних засобах параболічні антени часто встановлюються на великих вантажівках або спеціалізованих супутникових транспортних засобах, які можуть вмістити їхній розмір і вагу. Їхній високий коефіцієнт посилення робить їх ідеальними для застосувань, що вимагають високої швидкості передачі даних, таких як прямі трансляції або дистанційне зондування, але їхній розмір і необхідність точного вирівнювання можуть створювати проблеми в мобільних середовищах, таких як автомобілі. Тим не менш, досягнення в компактних параболічних конструкціях і системах стабілізації дозволили їх використовувати в деяких спеціалізованих автомобільних системах зв'язку, особливо там, де пріоритетом є висока пропускна здатність і зв'язок на великі відстані. Мікросмужкові патч-антени являють собою значний прорив у технології супутникового зв'язку, особливо підходять для середовищ з просторовими обмеженнями, таких як сучасні автомобілі. Ці антени являють собою плоскі, низькопрофільні структури, що складаються з провідної пластини, встановленої на діелектричній підкладці, із заземленою площиною під нею. Їх компактний розмір дозволяє безшовно інтегрувати їх у кузов автомобіля без суттєвого впливу на естетику чи аеродинаміку. Незважаючи на менший розмір порівняно з параболічними антенами, мікросмужкові патч-антени забезпечують помірне посилення, зазвичай від 5 до 9 дБі, що достатньо для багатьох автомобільних супутникових застосувань. Вони мають широку ширину променя, що означає, що вони можуть приймати сигнали в ширшому діапазоні кутів, що спрощує процес налаштування — критичний фактор, враховуючи постійний рух транспортних засобів. Наприклад, в автомобільних супутникових радіо та

навігаційних системах часто використовуються мікросмужкові патч-антени, оскільки їх можна легко вбудувати в дах автомобіля або дзеркало заднього виду. Їх низька вартість виробництва та легкість масового виробництва ще більше сприяють їх широкому використанню в споживчих автомобілях, де обмеження простору та економічні міркування є вирішальними. Крім того, досягнення в матеріалознавстві покращили їхню продуктивність, зробивши їх більш надійними для потокової передачі даних у режимі реального часу, екстреного зв'язку (рис. 1.2) [9].

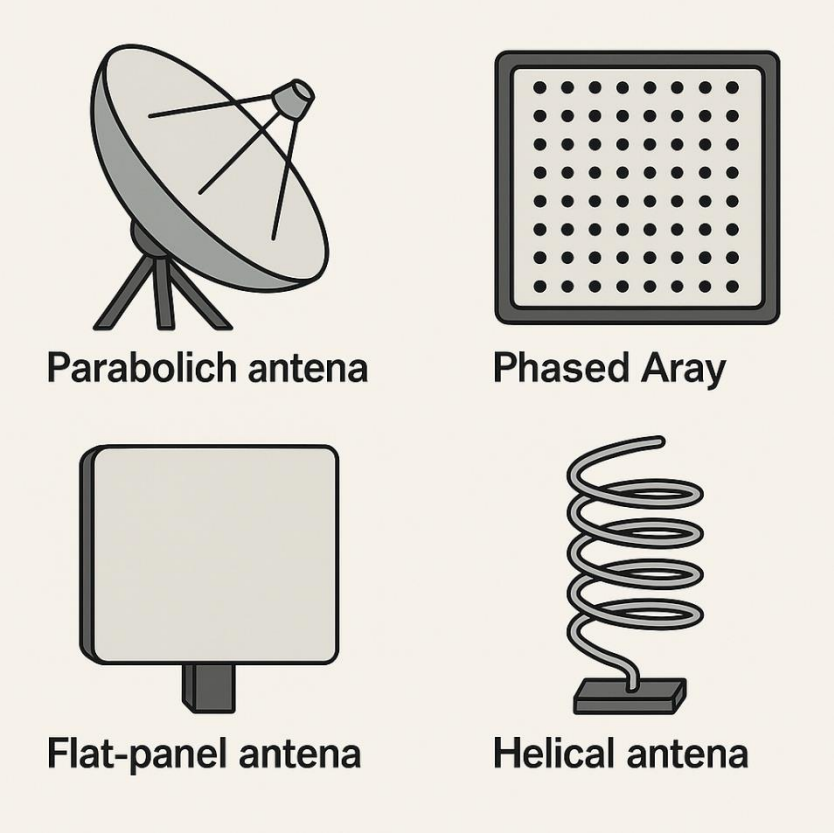


Рис. 1.2. Типи антен для супутникового зв’язку

Спіральні антени вирізняються своєю спіралеподібною структурою, яка забезпечує унікальні переваги для супутникового зв'язку, особливо в мобільних умовах, таких як автомобілі. Їхня спіральна конструкція забезпечує кругову поляризацію, що дозволяє антені підтримувати стабільне з'єднання незалежно від відносної орієнтації між супутником і приймачем — важлива якість для транспортних засобів, які постійно змінюють напрямок і положення. Спіральні

антени за своєю суттю міцні, їхня конструкція може витримувати вібрації, удари та фактори навколишнього середовища, що виникають під час експлуатації транспортного засобу. Їхня всеспрямована або напіввсеспрямована діаграма спрямованості робить їх добре придатними для стабільного зв'язку в динамічних умовах, таких як автомобілі, що рухаються міськими або сільськими районами, де супутниковий сигнал може бути перешкоджаний або коливатися. В автомобільних застосуваннях спіральні антени часто встановлюються на даху або задній частині транспортних засобів, забезпечуючи надійний зв'язок із супутниками, що використовуються для навігації, екстрених служб або широкосмугового Інтернету. Наприклад, деякі передові системи допомоги водієві (ADAS) та платформи підключених транспортних засобів використовують спіральні антени для забезпечення безперервного потоку даних, навіть під час швидкісних маневрів або несприятливих погодних умов. Їхня конструкція також забезпечує легкість встановлення та обслуговування, що робить їх привабливим рішенням для сучасних систем супутникового зв'язку для транспортних засобів.

Дипольні та монопольні антени є одними з найфундаментальніших типів антен, що використовуються в супутниковому зв'язку, особливо в автомобільному середовищі, завдяки своїй простоті та економічній ефективності. Дипольна антена зазвичай складається з двох провідних елементів, які випромінюють електромагнітні хвилі у всенаправленій діаграмі спрямованості, що робить її дуже придатною для прийому сигналів з різних напрямків без необхідності точного вирівнювання. Монопольні антени, варіація диполя, зазвичай встановлюються перпендикулярно до площини землі, що ще більше спрощує встановлення та підвищує довговічність. Ці антени особливо ефективні для супутникового телебачення та послуг зв'язку в транспортних засобах, де важливі простота використання та надійність. Їхня проста конструкція забезпечує швидке встановлення, мінімальне обслуговування, та сумісність з існуючими конструкціями транспортних засобів, що робить їх популярним вибором для повсякденного використання споживачами. Незважаючи на відносно менший коефіцієнт посилення порівняно зі складнішими антенами, дипольні та

монопольні антени чудово забезпечують стабільний прийом у середовищах, де орієнтація транспортного засобу може часто змінюватися. Їхня всеспрямована діаграма спрямованості забезпечує стабільний прийом сигналу навіть під час руху транспортного засобу, що є критично важливим для безперебійних розважальних, навігаційних та комунікаційних послуг на основі супутників. Досягнення в матеріалах та виробничих процесах ще більше покращили їхню продуктивність, гарантуючи, що вони залишаються практичним та економічним рішенням для сучасних автомобільних супутникових систем.

Фазовані антенні решітки є передовим етапом технології супутникового зв'язку, особливо в складних автомобільних застосуваннях, де необхідні динамічне відстеження та швидке регулювання променя. Ці антени складаються з кількох окремих випромінювальних елементів, кожен з яких може керуватися електронним способом для керування та формування променя без фізичного переміщення конструкції антени. Ця можливість електронного керування променем дозволяє швидко та точно націлювати супутники, що особливо вигідно в транспортних засобах, які постійно змінюють положення та орієнтацію. Як результат, фазовані антенні решітки дозволяють транспортним засобам підтримувати міцні та надійні зв'язки із супутниками навіть під час руху на високій швидкості або в середовищах з перешкодами для сигналу. Їхня здатність швидко регулювати напрямок променя зменшує потребу в механічних деталях, тим самим зменшуючи потребу в технічному обслуговуванні та збільшуючи термін служби системи. Завдяки цим особливостям, фазовані антенні решітки все частіше використовуються в передових транспортних супутникових системах, включаючи підключені автомобілі та автономні транспортні засоби, де передача даних у режимі реального часу та висока пропускна здатність є надзвичайно важливими. Ці антени також сумісні з автоматизованими алгоритмами відстеження, покращуючи загальну продуктивність у складних середовищах. З розвитком технологій очікується, що системи фазованих антенних решіток стануть більш компактними, доступними та широко впровадженими в

автомобільній промисловості, що відкриє шлях для безперебійного високоякісного супутникового зв'язку в русі [10].

Підсумовуючи, ландшафт супутникових антен, що використовуються в транспортних засобах, охоплює різноманітний спектр технологій, кожна з яких адаптована до конкретних експлуатаційних вимог. Параболічні антени пропонують високий коефіцієнт посилення та можливості зв'язку на великі відстані, що робить їх придатними для спеціалізованих наземних станцій та великомасштабних транспортних засобів, хоча вимоги до їх розміру та вирівнювання створюють обмеження в мобільному середовищі. Мікросмужкові патч-антени, завдяки своєму низькому профілю та легкості інтеграції, стали кращим вибором для більшості автомобільних застосувань, забезпечуючи помірний коефіцієнт посилення та широке покриття, що сприяє надійному супутниковому зв'язку в автомобілі. Спіральні антени вирізняються своєю надійністю та круговою поляризацією, забезпечуючи стабільний зв'язок у динамічних умовах руху транспортних засобів. Простіші антени, такі як диполі та монополі, забезпечують економічно ефективні, всенаправлені рішення для прийому, ідеальні для повсякденних потреб супутникового телебачення та зв'язку, тоді як фазовані антенні решітки є передовими завдяки своїм можливостям електронного керування променем, що дозволяє швидко відстежувати та покращувати зв'язок у передових транспортних системах. У сукупності ці типи антен демонструють постійні інновації та адаптацію в технологіях супутникового зв'язку, забезпечуючи надійне підключення транспортних засобів у різних середовищах. Зі зростанням прогресу, особливо в системах фазованих антенних решіток та мініатюризації, майбутній супутниковий зв'язок для транспортних засобів обіцяє більшу стабільність, вищі швидкості передачі даних та безперебійне підключення, підтримуючи все більш пов'язаний світ транспорту.

2. МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ АНТЕН ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Принципи побудови та розрахунку супутникових антен

Супутникові антени є критично важливими компонентами сучасних телекомунікаційних систем, що дозволяють передавати та приймати сигнали на великі відстані з високою точністю та ефективністю. Їх проектування та розрахунок охоплюють складну взаємодію геометричних, електромагнітних та інженерних принципів, спрямованих на оптимізацію сили сигналу, спрямованості та загальної продуктивності. Розуміння основних принципів їхньої конструкції та методів, що використовуються для розрахунку їхніх робочих параметрів, є важливим для інженерів та вчених, що займаються супутниковими технологіями. У цьому есе досліджуються основні концепції геометричних основ, формування спрямованості та розрахунку коефіцієнта посилення, надаючи вичерпний огляд принципів, що керують проектуванням супутникових антен [11].

Конструкція супутникових антен ґрунтується на точних геометричних міркуваннях, зокрема, що стосуються форми та розміру апертури, які безпосередньо впливають на діаграму спрямованості антени та загальну ефективність. Геометрія апертури, будь то параболічний відбивач, рупор чи решітка, визначає, як збираються або випромінюються електромагнітні хвилі, формуючи діаграму спрямованості — графічне представлення, що вказує на інтенсивність випромінювання антени в різних напрямках. Наприклад, параболічні відбивачі є кращими в супутникових антенах завдяки їхній здатності фокусувати сигнали у вузький промінь, тим самим збільшуючи коефіцієнт посилення та зменшуючи перешкоди. Вибираючи форму відбивача або випромінювача, інженери повинні враховувати такі фактори, як простота виготовлення, вага та певний діапазон частот; кругла, прямокутна або еліптична геометрія вибирається на основі цих критеріїв. Крім того, ефективна площа антени, яка вимірює здатність захоплювати падаючу енергію, є вирішальним

параметром. Вона часто пов'язана з фізичною апертурою, але скоригована на втрати ефективності, і визначає, яка потужність сигналу ефективно приймається або передається. Наприклад, більша ефективна площа корелює з вищою силою прийнятого сигналу, що є вирішальним для супутникового зв'язку, де сигнали слабкі після подолання великих відстаней. Загалом, геометричні міркування формують основу проектування антени, забезпечуючи відповідність фізичної структури бажаним електромагнітним характеристикам.

Формування діаграми спрямованості супутникової антени передбачає розуміння та маніпулювання фундаментальними концепціями спрямованості та ширини головного пелюстка. Спрямованість вимірює здатність антени фокусувати енергію в певному напрямку, при цьому високоспрямована антена створює вузький головний пелюстка, який концентрує передану або прийняту енергію для покращення якості сигналу та зменшення перешкод від небажаних напрямків. Ширина цього головного пелюстка, відома як ширина променя, є критичним параметром; вужчі промені пропонують вищий коефіцієнт посилення та кращу просторову роздільну здатність, але вимагають точніших механізмів наведення. Формування бічних пелюсток, які є вторинними максимумами в діаграмі спрямованості, є проблемою, оскільки вони можуть спричиняти перешкоди та знижувати загальну ефективність антенної системи. Придушення бічних пелюсток включає такі методи проектування, як звуження розподілу амплітуди по апертурі або використання спеціальних механізмів живлення для мінімізації небажаного випромінювання. Електромагнітне поле всередині апертури суттєво впливає на просторовий розподіл енергії, оскільки однорідні або неоднорідні поля можуть формувати діаграму спрямованості (рис. 2.1). Наприклад, рівномірно освітлена апертура створює синхрофункційну діаграму з вираженими бічними пелюстками, тоді як конічне освітлення зменшує рівні бічних пелюсток за рахунок деякого посилення головного пелюстка. Ці принципи є вирішальними при проектуванні антен, які відповідають певним критеріям покриття та перешкод, особливо в супутникових системах, де цілісність сигналу є першочерговою.

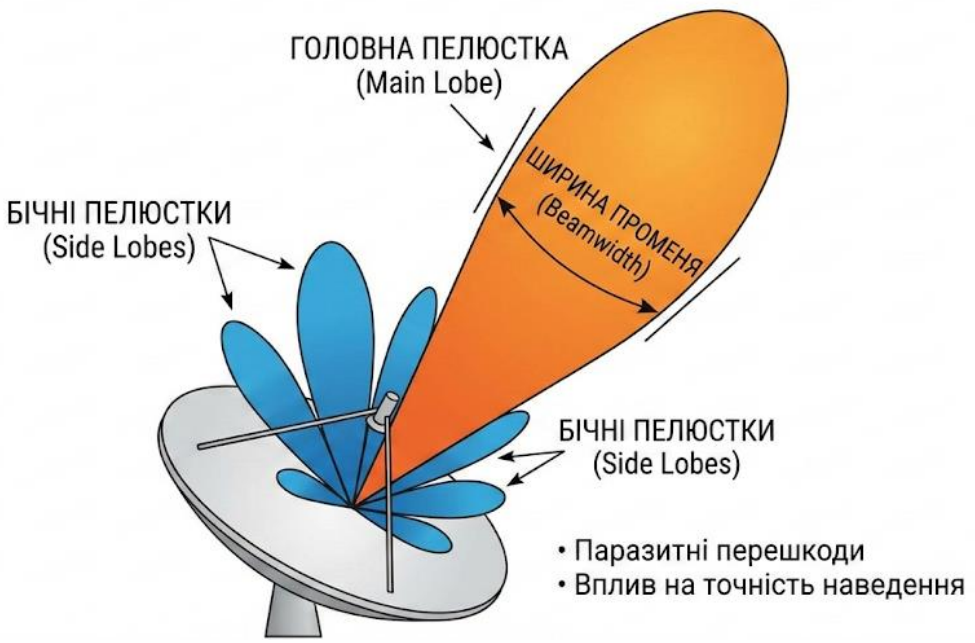


Рис. 2.1. Структура діаграми спрямованості антени супутникового зв'язку

Коефіцієнт посилення супутникової антени кількісно визначає її здатність спрямовувати радіочастотну енергію в певному напрямку та є фундаментальним параметром при оцінці продуктивності антени. Розрахунок посилення включає врахування кількох факторів, включаючи ефективність антени та геометричні параметри. Ефективність охоплює різні компоненти, такі як втрати в провідниках, діелектричні втрати та втрати живлення, які разом визначають, наскільки ефективно антена перетворює вхідну потужність на випромінювану електромагнітну енергію. Наприклад, високоякісні матеріали та точне виготовлення можуть мінімізувати втрати, тим самим збільшуючи посилення. Частота та геометрія суттєво впливають на посилення; зі збільшенням робочої частоти довжина хвилі зменшується, що призводить до більш компактної антени з вищим потенційним посиленням, за умови, що фізичний розмір залишається пропорційним довжині хвилі. Різні типи антен, такі як параболічні антени, спіральні антени або фазовані решітки, вимагають спеціальних розрахунків на основі їх геометрії. Коефіцієнт підсилення параболічної антени можна приблизно визначити за формулою (G = η□²□□□□□□), де (η□²) – ефективність, (A□□□) –

ефективна площа, а (λ) – довжина хвилі. Для фазованих антенних решіток коефіцієнт підсилення залежить від відстані між елементами, фазового керування та конфігурації решітки, що дозволяє динамічно керувати променем. Точні розрахунки коефіцієнта підсилення є важливими для систем супутникового зв'язку, щоб забезпечити достатній бюджет каналу, оптимізувати покриття та підтримувати надійну передачу даних, що підкреслює важливість точного електромагнітного та структурного аналізу при проектуванні антен [12].

Поляризація супутникової антени стосується орієнтації електричного поля електромагнітної хвилі під час її поширення в просторі, що відіграє життєво важливу роль у забезпеченні цілісності сигналу та мінімізації перешкод у системах супутникового зв'язку. У супутникових антенах використовуються три основні типи поляризації: лінійна, кругова та еліптична. Лінійна поляризація передбачає коливання електричного поля в одній площині, такій як горизонтальна або вертикальна, що підходить для систем, де відносна орієнтація передавача та приймача залишається постійною. Кругова поляризація, з іншого боку, передбачає обертання електричного поля по спіралі, що забезпечує переваги в сценаріях, коли супутник або наземна станція можуть бути зміщені або обертатися; це особливо корисно для мобільних та динамічних середовищ. Еліптична поляризація – це загальна форма, яка поєднує в собі риси лінійної та кругової поляризацій, пропонуючи гнучкість для спеціалізованих застосувань. Вибір поляризації в системах супутникового зв'язку залежить від таких факторів, як тип послуги, середовище та потенціал невідповідності поляризації. Правильне вирівнювання поляризації між передавальною та приймальною антенами є критично важливим, оскільки невідповідності можуть призвести до значних втрат сигналу, знижуючи ефективність системи та збільшуючи частоту помилок. Щоб мінімізувати ці втрати, інженери ретельно вибирають та вирівнюють типи поляризації та використовують методи фільтрації поляризації, щоб забезпечити максимальну передачу потужності, тим самим підтримуючи оптимальну якість зв'язку та продуктивність системи.

Ефективне живлення та узгодження супутникових антен є важливими для оптимізації передачі потужності, зменшення відбиттів та забезпечення стабільної роботи в потрібному діапазоні частот. Залежно від конструкції антени та робочого середовища використовується кілька типів фідерних шляхів, включаючи коаксіальні кабелі, хвилеводи та мікросмужкові лінії. Коаксіальні фідери широко використовуються завдяки простоті їх реалізації та широкому охопленню частот, тоді як хвилеводи є кращими для високочастотних застосувань завдяки низьким втратам та високій потужності. Мікросмужкові фідерні лінії, які є елементами друкованих схем, пропонують компактне та легке рішення, придатне для фазованих антенних решіток та інтегрованих систем. Правильне узгодження антени включає регулювання імпедансу в точці живлення відповідно до імпедансу передавача або приймача, зазвичай 50 Ом, щоб мінімізувати відбиття та максимізувати передачу потужності. Це досягається за допомогою узгоджувальних мереж, таких як шлейфи, трансформатори або елементи налаштування. Відбиття кількісно виражається коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ) або коефіцієнтом стоячої хвилі за напругою (КСХ), де низький КСХ вказує на хороше узгодження та мінімальне відбиття. Зменшення відбиттів має вирішальне значення, оскільки вони викликають стоячі хвилі, які можуть пошкодити обладнання та погіршити якість сигналу. Ефективні методи узгодження забезпечують ефективну роботу антени в межах її смуги пропускання, що призводить до покращення сили сигналу, зменшення втрат потужності та підвищення загальної надійності системи (табл. 2.1) [13].

На продуктивність та довговічність супутникових антен суттєво впливають фактори навколишнього середовища та властивості матеріалів, які необхідно ретельно враховувати під час проектування та розгортання. Наявність діелектриків, таких як атмосферна волога або діелектричні матеріали, що використовуються в конструкції антени, може змінити характеристики поширення електромагнітних хвиль, впливаючи на такі параметри, як імпеданс, коефіцієнт посилення та поляризація. Металеві поверхні, включаючи відбивні поверхні параболічних відбивачів, є важливими для спрямування електромагнітних хвиль,

але схильні до корозії, окислення та механічного зносу, що з часом може погіршити їхні відбивні властивості.

Таблиця 2.1.

Основні параметри та формули для розрахунку характеристик супутникових антен

Параметр	Позначення та формула	Пояснення та значення для проєктування
Коефіцієнт підсилення (Gain)	$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$	Визначає здатність антени фокусувати енергію. Залежить від діаметра дзеркала (D), довжини хвилі (λ) та ефективності (η). Чим вища частота, тим більше підсилення при тих же розмірах.
Ефективна площа апертури	$A_e = \eta \cdot A_{phys}$	Частина фізичної площі антени (Aphys), яка реально бере участь у прийомі сигналу. Враховує втрати на краях та нерівномірність опромінення.
Ширина діаграми спрямованості (HPBW)	$\theta_{3dB} \approx 70 \frac{\lambda}{D}$	Кутовий сектор, у межах якого потужність падає не більше ніж на 3 дБ (у 2 рази). Вузький промінь вимагає точніших систем трекінгу супутника в русі.
Добротність системи (G/T)	$G/T = G_{rx} - 10 \log_{10}(T_{sys})$	Основний показник якості приймальної системи. Відношення підсилення антени до сумарної шумової температури системи (Tsys). Критичний для слабких супутникових сигналів.
Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХН / VSWR)	$VSWR = \frac{1+\lvert\Gamma\rvert}{1-\lvert\Gamma\rvert}$	Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН, VSWR) характеризує ступінь узгодження навантаження з лінією передачі або антеною. Він визначається через модуль коефіцієнта відбиття | Γ | і показує співвідношення між максимальною та мінімальною амплітудами напруги стоячої хвилі в лінії передачі.
Втрати у вільному просторі (FSPL)	$L_{fs} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92.45$	Втрати сигналу на шляху від супутника до авто. Залежать від відстані (d, км) та частоти (f, ГГц). Використовується для розрахунку бюджету лінії.

Конструктивні обмеження часто включають вибір матеріалів, які збалансовують вагу, довговічність та електромагнітні характеристики, особливо

для космічних або мобільних наземних станцій. Крім того, коливання температури створюють серйозну проблему, оскільки екстремальна спека або холод можуть спричинити розширення або стиснення матеріалу, що призводить до змін параметрів антени, таких як резонансна частота, імпеданс та діаграма спрямованості. Механічні навантаження від вітру, вібрації або руху транспортних засобів додатково впливають на стабільність та вирівнювання антени, потенційно спричиняючи неправильне спрямування або деформацію. Інженери повинні використовувати міцні матеріали та структурні підсилення, а також рішення для терморегулювання, щоб пом'якшити цей вплив на навколишнє середовище. Крім того, іноді використовуються адаптивні налаштування або процедури калібрування для компенсації змін параметрів під час руху транспортного засобу, забезпечуючи стабільні та надійні канали зв'язку в динамічних умовах [14].

Точне моделювання та перевірка параметрів супутникової антени є важливими кроками для забезпечення того, щоб теоретичні конструкції втілювалися в реальні характеристики. Сучасні методи обчислювальної електродинаміки, такі як метод моментів (MOM), метод скінченних елементів (FEM) та метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), широко використовуються для моделювання складної електромагнітної поведінки антен з високою точністю. MOM особливо ефективний для аналізу тонкодротяних та поверхневих структури на основі безпосереднього розв'язання інтегральних рівнянь на поверхні антени, що забезпечує детальне уявлення про розподіл струму та характеристики імпедансу. З іншого боку, метод скінченних елементів (FEM) поділяє структуру антени на менші скінченні елементи, що робить її придатною для складних геометрій та діелектричних матеріалів, що дозволяє проводити універсальний та детальний аналіз поля. FDTD пропонує підхід у часовій області, який дозволяє моделювати широкосмугові відгуки та перехідні явища, що робить його безцінним для аналізу імпульсних відгуків та широкосмугових антенних систем. Ці обчислювальні інструменти сприяють аналізу критичних параметрів, таких як S-параметри, які описують характеристики відбиття та передачі, та коефіцієнт постійного зв'язку (SCR), який вказує на якість узгодження імпедансу.

Крім того, діаграму спрямованості, включаючи головні та бічні пелюстки, можна візуалізувати та оптимізувати за допомогою моделювання. Верифікація включає порівняння цих змодельованих параметрів з вимірюваннями, отриманими з прототипів або операційних систем, що гарантує, що теоретичні моделі точно прогнозують реальну поведінку. Цей процес допомагає виявити розбіжності, спричинені виробничими допусками, невідповідностями матеріалів або впливом навколишнього середовища, дозволяючи інженерам удосконалювати конструкції перед розгортанням. Загалом, моделювання та верифікація є основоположними для розробки надійних, високопродуктивних супутникових антен, що подолання розриву між концептуальним проектуванням та практичним застосуванням.

На завершення, принципи побудови та розрахунку супутникових антен охоплюють широкий спектр взаємопов'язаних концепцій, які є життєво важливими для ефективних систем супутникового зв'язку. Геометричні основи, включаючи форму апертури та ефективну площу, закладають основу для визначення фундаментальних характеристик випромінювання антени. Формування діаграми спрямованості шляхом ретельного маніпулювання шириною головного пелюстка та придушенням бічних пелюсток забезпечує точне формування променя та зменшення перешкод. Розрахунок коефіцієнта посилення антени з урахуванням ефективності та геометричних факторів безпосередньо впливає на бюджет каналу зв'язку та загальну продуктивність системи. Характеристики поляризації є критично важливими для максимізації цілісності сигналу та мінімізації втрат, особливо в динамічних середовищах. Ефективні методи живлення та узгодження оптимізують передачу потужності та зменшують відбиття, підвищуючи експлуатаційну стабільність. Екологічні та матеріальні аспекти додатково гарантують, що антени збережуть свою продуктивність з часом, незважаючи на зовнішні впливи. Нарешті, передове моделювання та верифікація за допомогою обчислювальних інструментів дозволяють точно прогнозувати та уточнювати параметри антени, гарантуючи, що теоретичні конструкції відповідають реальним вимогам. Разом ці принципи утворюють комплексну основу для проектування, аналізу та розгортання супутникових антен, здатних

підтримувати постійно зростаючі потреби сучасних телекомунікаційних мереж, підкреслюючи важливість ретельної інженерії та постійної верифікації в цій життєво важливій галузі.

2.2. Моделювання електромагнітних характеристик антен

Електромагнітні характеристики антен є фундаментальними для розуміння їхньої роботи в системах бездротового зв'язку, радарах, супутниковому зв'язку та численних інших технологічних застосуваннях. Антени служать інтерфейсом між електромагнітними хвилями у вільному просторі та електричними ланцюгами, сприяючи передачі та прийому сигналів у різних діапазонах частот. Глибоке розуміння поширення електромагнітних хвиль всередині антен, поряд з ключовими параметрами, такими як коефіцієнт підсилення, спрямованість та діаграма спрямованості, є важливим для оптимізації конструкції та функціональності антени. На ці параметри впливають різні фактори, включаючи геометрію антени, використані матеріали та навколишнє середовище. Досліджуючи основні електромагнітні властивості антен, інженери та дослідники можуть розробляти більш ефективні та цілеспрямовані системи зв'язку, забезпечуючи надійну передачу та прийом сигналу в складних експлуатаційних сценаріях (рис. 2.2) [15].

Електромагнітні властивості антен фундаментально залежать від того, як електромагнітні хвилі поширюються, випромінюються та взаємодіють з навколишнім середовищем. Коли антена передає, вона перетворює електричну енергію на електромагнітні хвилі, що поширюються в просторі; і навпаки, вона вловлює електромагнітні хвилі, що надходять від зовнішніх джерел. Характеристики поширення сильно залежать від параметрів антени, таких як коефіцієнт підсилення, який вимірює здатність фокусувати енергію в певному напрямку, та спрямованість, яка вказує на концентрацію випромінювання під певними кутами. Діаграма спрямованості, графічне зображення випромінюваної потужності антени в просторі, дає уявлення про області найсильнішого випромінювання або прийому. На цю електромагнітну поведінку впливають кілька

факторів, включаючи фізичні розміри антени відносно довжини хвилі, форму та розмір випромінюючих елементів, а також властивості навколишнього середовища.



Рис. 2.2. Узагальнений алгоритм проведення електромагнітного моделювання антени

Наприклад, більша антена або антена з добре розробленою формою може створити більш сфокусовану діаграму спрямованості з вищим підсиленням, що має вирішальне значення для зв'язку на великі відстані. Вибір матеріалів, наприклад, використання діелектриків з низькими втратами, також відіграє життєво важливу роль у мінімізації втрат енергії та оптимізації електромагнітних характеристик. Розуміння цих електромагнітних властивостей дозволяє точно контролювати покриття сигналу, його силу та ефективність, що є критично важливим для застосувань, починаючи від мобільних пристроїв і закінчуючи супутниковими системами.

Різні типи антен демонструють різні електромагнітні характеристики, адаптовані до конкретних застосувань, причому кожен тип демонструє унікальну поведінку випромінювання та взаємодію з електромагнітними полями. Дипольні антени, одні з найпростіших і найпоширеніших, зазвичай випромінюють лінійно поляризовані електромагнітні хвилі з характерною діаграмою спрямованості у формі бублика. Їхня поляризація та ефективність випромінювання значною мірою залежать від їхньої довжини відносно довжини хвилі; наприклад, диполь з половинною довжиною хвилі демонструє максимальну ефективність випромінювання та передбачувану діаграму спрямованості, що робить його придатним для багатьох цілей зв'язку. Петльові антени, які складаються з провідних петель, в основному генерують магнітні поля та відомі своєю високою ефективністю прийому радіосигналів, особливо в діапазонах КХ та УКХ. Їхня електромагнітна взаємодія відбувається через магнітний зв'язок, що може бути вигідним у певних середовищах, де взаємодія електричного поля менш бажана. Решіткові антени, що складаються з кількох окремих випромінювачів, розташованих у певних конфігураціях, перевершують можливості формування променя. Вони можуть електронно керувати та формувати діаграму спрямованості, підвищуючи силу сигналу в потрібних напрямках, одночасно пригнічуючи перешкоди від інших. Електромагнітний зв'язок між елементами в антенній решітці впливає на загальну діаграму спрямованості та коефіцієнти посилення, що вимагає ретельного проектування для оптимізації продуктивності. Ці різноманітні типи антен демонструють, як електромагнітні характеристики складно пов'язані з геометрією та розташуванням, що дозволяє знаходити індивідуальні рішення для різних технологічних потреб.

Методи математичного моделювання є незамінними інструментами для аналізу та прогнозування електромагнітної поведінки антен, що дозволяє зробити процес проектування одночасно точним та ефективним. В основі цих методів лежать рівняння Максвелла, які керують усіма класичними електромагнітними явищами. Розв'язуючи рівняння Максвелла за певних граничних умов, інженери можуть отримати теоретичні діаграми спрямованості та зрозуміти фундаментальні

електромагнітні взаємодії всередині структури антени. Для складних геометрій та складів матеріалів використовуються числові методи, такі як метод моментів (MoM) та метод скінченних елементів (FEM), для отримання наближених рішень з високою точністю. MoM особливо ефективний для тонкодротяних антен та задач поверхневого струму, надаючи уявлення про розподіл струму та характеристики випромінювання. FEM, з іншого боку, добре підходить для складних тривимірних структур, дозволяючи детально аналізувати електромагнітні поля всередині та навколо антени. Сучасні засоби моделювання та програмні пакети, такі як CST Microwave Studio, ANSYS HFSS та FEKO, сприяють реалізації цих математичних моделей, дозволяючи створювати віртуальні прототипи та оптимізувати їх перед фізичним виготовленням. Ці інструменти містять передові алгоритми, які враховують властивості матеріалів, граничні умови та фактори навколишнього середовища, що призводить до високонадійних прогнозів продуктивності антени. Загалом, синергія математичного моделювання та обчислювального моделювання відіграє ключову роль у розвитку технології антен, гарантуючи, що конструкції відповідають суворим вимогам сучасних систем зв'язку [16].

Кілька параметрів критично впливають на електромагнітні характеристики антен, серед яких геометрія та фізичні розміри є одними з найважливіших. Форма, розмір та конфігурація антени безпосередньо впливають на її здатність ефективно випромінювати та приймати електромагнітні хвилі. Наприклад, збільшення довжини дипольної антени зазвичай підвищує її коефіцієнт посилення та спрямованість, тоді як конкретна форма, така як конструкція Ягі-Уда або спіральна, може бути оптимізована для покращення характеристик смуги пропускання та поляризації. Властивості матеріалів також відіграють вирішальну роль; провідні елементи, виготовлені з високопровідних металів, таких як мідь або алюміній, зменшують резистивні втрати, тим самим підвищуючи ефективність випромінювання. Діелектричні матеріали, що використовуються в підкладках антен, впливають на такі параметри, як імпеданс, смуга пропускання та розмір, що дозволяє мініатюризацію або розширення смуги пропускання. Фактори навколишнього середовища також впливають на електромагнітні характеристики,

оскільки наявність поблизу об'єктів, таких як будівлі, дерева або інші антени, може спричинити розсіювання, відбиття та взаємний зв'язок, що спотворює діаграми спрямованості та знижує якість сигналу. Вплив землі, особливо в антенах наземної площини або тих, що працюють поблизу відбиваючих поверхонь, може змінити спрямованість випромінювання та узгодження імпедансу. Отже, розуміння та контроль цих параметрів є важливими для проектування антен, які надійно працюють у різних робочих середовищах, забезпечуючи оптимальне покриття сигналу та надійність. Незважаючи на досягнення в електромагнітному моделюванні, залишається кілька проблем у точному моделюванні характеристик антен, особливо для складних структур. Обчислювальна складність, пов'язана з високоточними моделями, вимагає значної обчислювальної потужності та часу, особливо при роботі зі складними геометріями або багатоматеріальними композиціями. Числові методи, такі як MoM та FEM, хоча й потужні, за своєю суттю включають наближення, які можуть вносити похибки; наприклад, дискретизація безперервних поверхонь або об'ємів може призвести до неточностей у розподілі струму або електромагнітних полях. Ці обмеження стають більш вираженими при моделюванні антен у реальних умовах, де такі фактори, як багатопроменеве поширення, нерівності поверхні та неоднорідність матеріалів, ускладнюють аналіз. Як результат, результати моделювання часто потребують перевірки за допомогою експериментальних вимірювань, таких як випробування антен у безлунних камерах або польові випробування, щоб перевірити точність теоретичних моделей. Цей ітеративний процес моделювання, тестування та уточнення є життєво важливим для забезпечення відповідності розроблених антен заданим критеріям продуктивності в реальних умовах експлуатації, що скорочує розрив між теоретичними прогнозами та практичним застосуванням (табл. 2.2).

Нещодавні досягнення в електромагнітному моделюванні зосереджені на розробці більш складних та ефективних методів подолання існуючих обмежень. Гібридні підходи до моделювання, які поєднують різні числові методи, дозволяють інженерам використовувати сильні сторони кожного з них, наприклад,

інтегруючи MoM для поверхневих струмів з FEM для складних діелектричних структур, що призводить до більш повних і точних симуляцій. Крім того, інтеграція алгоритмів машинного навчання в електромагнітне моделювання стає перспективною тенденцією; ці методи можуть аналізувати величезні набори даних результатів моделювання та експериментальних вимірювань для швидкого та точного прогнозування продуктивності антени, що сприяє швидким ітеративним циклам проектування.

Таблиця 2.2.

Порівняльний аналіз чисельних методів моделювання антен

Метод моделювання	Принцип дії	Область ефективного застосування	Переваги та недоліки
Метод моментів (MoM)	Базується на розв'язанні інтегральних рівнянь для поверхневих струмів.	Тонкодротяні антени, планарні структури, задачі випромінювання у відкритий простір.	+ Висока точність для металевих поверхонь. - Складність розрахунку об'ємних діелектриків.
Метод скінченних елементів (FEM)	Розбиття всього об'єму (включно з повітрям навколо) на тетраедри та розв'язання диференціальних рівнянь.	Складні 3D-геометрії, антени з неоднорідними діелектриками, внутрішні задачі (хвилеводи).	+ Універсальність для складних матеріалів. - Вимагає значних обчислювальних ресурсів для великих відкритих просторів.
Гібридні методи	Поєднання різних підходів (наприклад, MoM для поверхні + FEM для об'єму).	Електрично великі об'єкти зі складними локальними деталями (наприклад, антена на корпусі авто).	+ Оптимізація ресурсів шляхом використання сильних сторін кожного методу. - Складність налаштування моделі.

Моделі машинного навчання також можуть виявляти тонкі кореляції та оптимізувати параметри антени поза межами традиційних методів. Заглядаючи вперед, майбутнє високоточного електромагнітного моделювання полягає в

розробці багатофізичних моделей у реальному часі, що враховують зміни навколишнього середовища, виробничі допуски та адаптивні алгоритми. Такі інновації дозволять розробляти більш стійкі, ефективні та універсальні антени, здатні відповідати дедалі вимогливішим вимогам сучасних систем бездротового зв'язку, радіолокаційних та супутникових систем.

Підсумовуючи, розуміння електромагнітних характеристик антен є фундаментальним для оптимізації їхньої продуктивності в різних сферах застосування. Це включає вивчення того, як поширюються електромагнітні хвилі всередині антен і як ключові параметри, такі як коефіцієнт підсилення, спрямованість та діаграми спрямованості, залежать від таких факторів, як геометрія, матеріали та умови навколишнього середовища. Різні типи антен, від простих диполів до складних конфігурацій антенних решіток, демонструють унікальну електромагнітну поведінку, яку можна адаптувати до конкретних потреб. Методи математичного моделювання, що ґрунтуються на рівняннях Максвелла, доповнені передовими обчислювальними інструментами, є важливими для прогнозування та вдосконалення продуктивності антени, хоча такі проблеми, як обчислювальна складність та мінливість навколишнього середовища, залишаються незмінними. Нещодавні технологічні досягнення, включаючи гібридні підходи до моделювання та інтеграцію машинного навчання, обіцяють підвищити точність та ефективність електромагнітного моделювання. Оскільки дослідження продовжують розвиватися, ці інновації відіграватимуть вирішальну роль у проектуванні антен наступного покоління, які будуть більш ефективними, адаптивними та надійними, прокладаючи шлях для розвитку бездротового зв'язку, радіолокаційних та супутникових технологій. Зрештою, постійний розвиток методів моделювання та розуміння електромагнітних властивостей забезпечить, щоб технологія антен йшла в ногу зі зростаючими вимогами сучасної електроніки та систем зв'язку [17].

2.3. Методи оптимізації конструкції антени для автомобільних умов

У швидкозмінному ландшафті автомобільних технологій надійні та ефективні системи бездротового зв'язку стали незамінними. Оскільки транспортні засоби інтегрують дедалі складніші функції зв'язку — від навігації та інформаційно-розважальних систем до зв'язку «автомобіль-все» (V2X), — важливість оптимізації конструкції антени в автомобільному середовищі значно зросла. На відміну від звичайних антен, що використовуються в стаціонарних пристроях, автомобільні антени стикаються з унікальними проблемами, включаючи суворі умови навколишнього середовища, естетичні міркування та необхідність безшовної інтеграції з конструкціями транспортних засобів. У цьому есе досліджуються ключові методи оптимізації конструкції антени для автомобільних застосувань, зосереджуючись на виборі матеріалів, методах розміщення та інтеграції, а також передових технологічних інноваціях. Розуміння цих аспектів має вирішальне значення для інженерів, які прагнуть розробити надійні, високопродуктивні антени, що відповідають високим вимогам сучасних транспортних засобів.

Вибір відповідних матеріалів є основоположним для продуктивності та довговічності автомобільних антен. Провідні матеріали, такі як мідь, алюміній та срібло, зазвичай використовуються завдяки їхній високій електропровідності, що сприяє ефективній передачі та прийому сигналу. Мідь, наприклад, має чудову провідність і широко використовується в традиційних елементах антен; однак вона може бути схильною до корозії у вологому або солоному середовищі, що вимагає захисних покриттів. Алюміній, завдяки своїм легким та стійким до корозії властивостям, є практичною альтернативою, особливо в тих сферах застосування, де зниження ваги є важливим. Крім того, останні досягнення включають гнучкі провідні полімери та композити, які дозволяють антенам адаптуватися до складних поверхонь транспортних засобів. Гнучкість матеріалів дозволяє інтегрувати антени в криволінійні або нерівні поверхні без шкоди для структурної цілісності, а довговічність забезпечує довготривалу функціональність, незважаючи на вплив коливань температури, вібрацій та фізичних впливів. Наприклад, гнучкі друковані антени, вбудовані в панелі кузова автомобіля,

повинні витримувати багаторазові вигини та вплив навколишнього середовища. Тому критерії вибору матеріалів для автомобільних антен виходять за рамки провідності та включають стійкість до навколишнього середовища, механічну гнучкість та сумісність з виробничими процесами. Зрештою, ідеальний матеріал повинен поєднувати електричні характеристики зі стійкістю до впливу навколишнього середовища, таких як дощ, пил та вплив ультрафіолетового випромінювання, забезпечуючи стабільну якість сигналу протягом усього терміну служби автомобіля (рис. 2.3) [18].

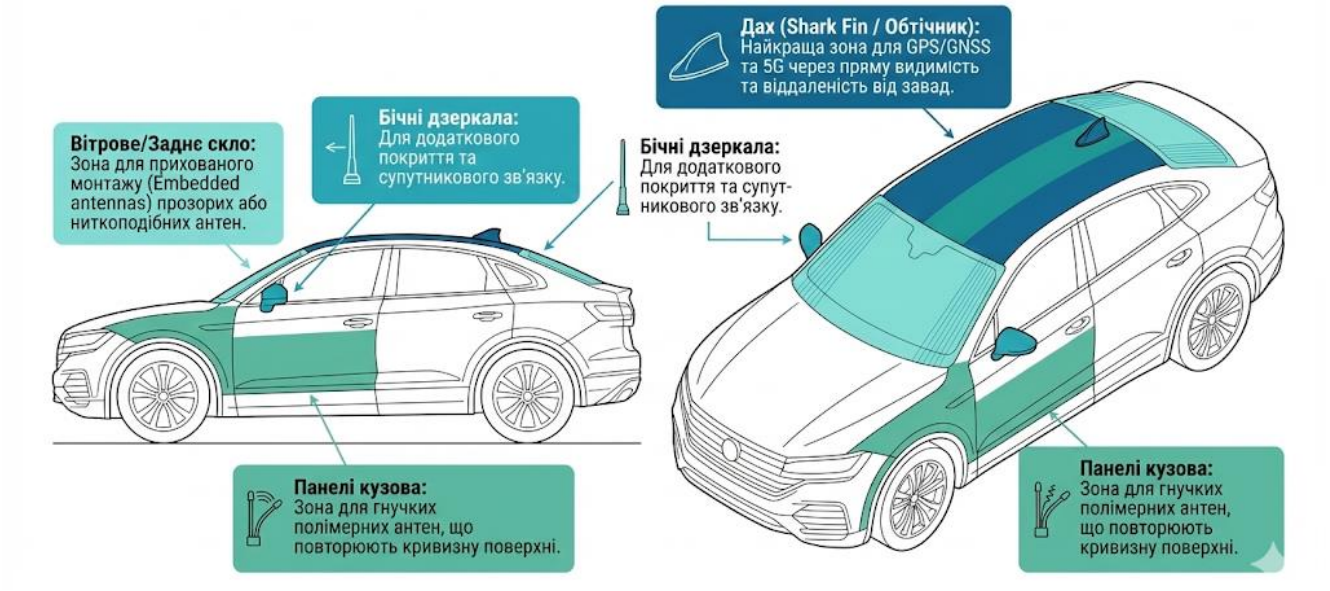


Рис. 2.3. Оптимальні зони розміщення та інтеграції антенних систем у конструкцію автомобіля

Стратегічне розміщення та продумана інтеграція антен мають вирішальне значення для мінімізації перешкод сигналу та максимізації продуктивності в автомобільному середовищі. Оптимальне розташування передбачає розміщення антен на поверхнях автомобіля, де вони можуть забезпечити безперешкодну пряму видимість для супутників зв'язку або інших транспортних засобів. Звичайні місця розташування включають дах, багажник або бічні дзеркала, вибрані на основі таких факторів, як легкість доступу, структурна підтримка та видимість радіосигналів. Наприклад, антени, встановлені на даху, зазвичай забезпечують

краще покриття для сигналів GPS та стільникового зв'язку завдяки своєму піднятому розташуванню, зменшуючи перешкоди від інших компонентів автомобіля. Методи інтеграції ще більше підвищують продуктивність, вбудовуючи антени в панелі кузова автомобіля або скляні поверхні, тим самим зменшуючи фізичний слід та запобігаючи естетичним порушенням. Така інтеграція вимагає точного проектування, щоб уникнути перешкод від металевого корпусу автомобіля, який може послаблювати або спотворювати сигнали. Поширеними є такі методи, як використання обтічника антен — захисних кожухів, які пропускають радіохвилі, одночасно захищаючи від факторів навколишнього середовища. Крім того, для покращення естетичної привабливості та аеродинамічної ефективності автомобіля все частіше використовуються підходи до дизайну з принципом «прихованого монтажу». Наприклад, низькопрофільні або вмонтовані антени не тільки бездоганно поєднуються із зовнішнім виглядом автомобіля, але й зменшують опір, що може позитивно вплинути на паливну економічність та зниження шуму. Ці стратегії розміщення та інтеграції є важливими для забезпечення надійної роботи антен за різних умов руху, зберігаючи при цьому цілісність конструкції автомобіля.

Інноваційні технологічні досягнення продовжують розширювати межі можливостей автомобільних антен. Наприклад, системи з кількома входами та виходами (MIMO) використовують кілька антен для одночасної передачі та прийому сигналів, значно покращуючи пропускну здатність даних та стабільність з'єднання. Ця технологія життєво важлива для підтримки високошвидкісних застосувань, таких як підключення 4G/5G та оновлення навігації в режимі реального часу. Багатодіапазонні та широкосмугові антени розроблені для роботи в кількох діапазонах частот, що дозволяє транспортним засобам обробляти різні стандарти зв'язку за допомогою однієї інтегрованої антенної системи. Це зменшує складність та вартість, одночасно підвищуючи універсальність. Крім того, поява метаматеріалів — штучно створених матеріалів з унікальними електромагнітними властивостями — відкриває нові можливості для покращення продуктивності антен. Метаматеріали можуть ефективніше фокусувати та спрямовувати

радіохвилі, що призводить до збільшення сили сигналу та покращення спрямованості. Наприклад, дослідники продемонстрували лінзи на основі метаматеріалів, які концентрують сигнали в потрібних напрямках, долаючи типове погіршення сигналу, спричинене конструкціями транспортних засобів. Ці передові технології не тільки покращують якість сигналу, але й дозволяють створювати більш компактні та непомітні конструкції антен, що відповідають естетичним та аеродинамічним цілям. Їхня інтеграція в автомобільні системи є прикладом того, як передове матеріалознавство та електромагнітна інженерія можуть вирішувати складні вимоги сучасних мереж автомобільного зв'язку, прокладаючи шлях для розумніших та більш підключених транспортних засобів [19].

Ефективна обробка та налаштування сигналів є важливими для забезпечення оптимальної роботи автомобільних антен, незважаючи на динамічні та часто складні середовища, з якими вони стикаються. Адаптивні методи налаштування дозволяють антенам автоматично регулювати свій імпеданс та резонансні характеристики у відповідь на зміну умов навколишнього середовища, таких як коливання температури, швидкість автомобіля та навколишні перешкоди. Наприклад, електронно настроювані узгоджувальні мережі можуть змінювати параметри антени в режимі реального часу, підтримуючи оптимальну силу та якість сигналу. На додаток до цього, використовуються методи фільтрації сигналів для зменшення перешкод від інших електронних систем у транспортному засобі, таких як інформаційно-розважальні модулі, блоки керування двигуном або сусідні бездротові пристрої. Фільтри, такі як смугові, режекторні та адаптивні фільтри, служать для ізоляції потрібних сигналів, одночасно придушуючи шум та небажані сигнали, тим самим підвищуючи надійність прийому. Крім того, складні програмні алгоритми відіграють життєво важливу роль у постійному аналізі вхідних сигналів та регулюванні параметрів передачі для максимізації пропускної здатності даних та мінімізації помилок. Такі методи, як формування променя та векторна обробка сигналів, дозволяють антенам динамічно спрямовувати фокус сигналу на певні цілі або налаштовуватися на ефекти багатопроменевого

поширення. У поєднанні ці стратегії обробки та налаштування сигналів дозволяють автомобільним антенам забезпечувати стабільний, високоякісний зв'язок навіть у складних електромагнітних середовищах, що зрештою підтримує безперебійне з'єднання, яке вимагається сучасними транспортними засобами. Ретельне моделювання та реальні випробування є невід'ємними кроками в розробці та валідації автомобільних антенних систем. Обчислювальне моделювання, включаючи метод скінченних елементів (МСЕ) та програмне забезпечення для електромагнітного моделювання, дозволяє інженерам прогнозувати роботу антени в складному електромагнітному середовищі автомобіля ще до створення фізичних прототипів. Ці моделі допомагають виявити потенційні проблеми, такі як погіршення сигналу, перешкоди або небажані діаграми спрямованості, що дозволяє конструкторам оптимізувати розміщення, форму та матеріали у віртуальному середовищі (табл. 2.3).

Таблиця 2.3.

Методи оптимізації автомобільних антенних систем

Напрямок оптимізації	Метод / Технологія	Переваги та вплив на характеристики
Матеріали та конструкція	Гнучкі полімери та композити	Дозволяють інтегрувати антени у криволінійні поверхні кузова, стійкі до вібрацій та деформацій.
	Використання метаматеріалів	Штучні структури, що дозволяють фокусувати сигнал, покращувати спрямованість та мініатюризувати антену.
	Прихований монтаж (Flush mount)	Покращує аеродинаміку (зменшує опір повітря) та захищає від погодних умов, не порушуючи естетику авто.
Електроніка та обробка сигналів	Технологія MIMO	Використання кількох антен для одночасної передачі/прийому, що збільшує пропускну здатність та стабільність лінку.
	Адаптивне налаштування імпедансу	Автоматична корекція параметрів у реальному часі для компенсації впливу навколишнього середовища (дощ, сніг, наближення об'єктів).
	Фільтрація та	Динамічне формування променя на

	Beamforming	супутник та відсіювання перешкод від бортової електроніки авто.

Після моделювання проводяться масштабні реальні випробування в різних умовах руху для оцінки роботи антени в реальних сценаріях — від міського руху до швидкостей на автомагістралях та несприятливих погодних умов, таких як дощ чи сніг. Такі випробування вимірюють такі параметри, як сила сигналу, швидкість передачі даних та сприйнятливість до перешкод, надаючи критично важливі дані для вдосконалення проектів. Крім того, оцінки електромагнітної сумісності (EMC) гарантують, що антенна система не впливає негативно та не зазнає впливу інших електронних компонентів у автомобілі, забезпечуючи відповідність галузевим стандартам та правилам безпеки. Ці процеси валідації є життєво важливими для створення надійних, стійких антенних рішень, здатних стабільно працювати в різних середовищах, тим самим гарантуючи, що системи підключення автомобіля відповідають високим стандартам, очікуваним у сучасних автомобільних застосуваннях. З розвитком автомобільних комунікаційних систем майбутнє проектування антен формується кількома суттєвими викликами та новими тенденціями. Електромагнітні перешкоди (ЕМП) від дедалі складнішої автомобільної електроніки є постійною перешкодою, що вимагає інноваційних стратегій екранування, фільтрації та проектування для запобігання погіршенню сигналу. Досягнення мініатюризації без шкоди для продуктивності залишається ключовою метою, особливо враховуючи, що транспортні засоби вимагають більше антен для різних стандартів зв'язку, що вимагає компактних, багатофункціональних рішень, які не ставлять під загрозу аеродинаміку чи естетику. Поточна інтеграція технології 5G вводить нові діапазони частот та вищі швидкості передачі даних, вимагаючи антен, здатних підтримувати вищу пропускну здатність та меншу затримку. Майбутні конструкції антен, ймовірно, включатимуть передові матеріали, такі як метаматеріали, для покращення фокусування сигналу та зменшення розміру, а також використовуватимуть інтелектуальні, програмно-керовані механізми налаштування. Крім того, тенденція до повністю підключених та автономних транспортних засобів

підкреслює потребу в антенах, які можуть надійно та ефективно обробляти масивний обмін даними. Вирішення цих проблем вимагатиме міждисциплінарних підходів, що поєднують електромагнітну інженерію, матеріалознавство та інтелектуальну обробку сигналів, прокладаючи шлях для транспортних засобів, які не тільки більш підключені, але й більш стійкі та ефективні у своїх комунікаційних можливостях.

Підсумовуючи, оптимізація конструкції антени для автомобільного середовища передбачає багатогранний підхід, який охоплює ретельний вибір матеріалів, стратегічне розміщення та інтеграцію, а також передові технологічні інновації. Вибір міцних, гнучких провідних матеріалів забезпечує довгострокову надійність в умовах впливу навколишнього середовища, тоді як інтелектуальні методи розміщення та прихованої інтеграції покращують як продуктивність, так і естетику автомобіля. Передові технології антен, такі як системи MIMO, широкосмугові конфігурації та метаматеріали, розширюють межі сили сигналу, спрямованості та мініатюризації. Додаткові методи обробки та налаштування сигналів, включаючи адаптивні корекції та складні алгоритми, ще більше покращують якість зв'язку в динамічних умовах. Ретельне моделювання та реальні випробування підтверджують ці конструкції, забезпечуючи електромагнітну сумісність та надійну роботу в різних сценаріях. Забігаючи вперед, вирішальне значення матиме вирішення таких проблем, як електромагнітні перешкоди, обмеження розмірів та інтеграція нових стандартів 5G. Оскільки автомобільний зв'язок продовжує розвиватися, інноваційні матеріали, розумніші конструкції та більш стійкі системи будуть необхідними для підтримки наступного покоління підключених автономних транспортних засобів. Зрештою, ці розробки сприятимуть безпечнішим, ефективнішим та технологічно досконалішим транспортним системам у всьому світі.

2.4. Узгодження антени з радіочастотним трактом та мінімізація втрат

Ефективний зв'язок через радіочастотні (РЧ) системи критично залежить від ефективної передачі сигналів від передавача до антени і, зрештою, до навколишнього середовища. Центральним у цьому процесі є концепція узгодження антени, яка передбачає узгодження імпедансу антени з імпедансом РЧ-лінії передачі для максимізації передачі потужності та мінімізації відбиттів сигналу. РЧ-тракт, що складається з різних компонентів, таких як кабелі, роз'єми та мережі узгодження, відіграє життєво важливу роль у підтримці цілісності сигналу. Правильне узгодження імпедансу є фундаментальним для оптимізації продуктивності РЧ-систем шляхом зменшення втрат і забезпечення того, щоб максимальна кількість переданої потужності досягала цільового значення. У цьому есе досліджуються основні концепції узгодження антени та компонентів РЧ-тракту, обговорюються практичні методи досягнення оптимального узгодження імпедансу та досліджується негативний вплив неузгоджених імпедансів на ефективність системи.

Розуміння узгодження антени та основ радіочастотного тракту є важливим для проектування ефективних систем радіозв'язку. Імпеданс антени, який характеризується переважно її опором та реактивним опором, зазвичай у більшості радіочастотних застосувань становить приблизно 50 Ом. Цей імпеданс має бути узгоджений з імпедансом лінії передачі, щоб запобігти відбиттю потужності, які можуть спричинити погіршення сигналу. Невідповідність імпедансу виникає, коли імпеданс антени відрізняється від імпедансу лінії передачі, що призводить до часткового відбиття радіочастотної енергії назад до передавача, що зменшує кількість ефективно випромінюваної потужності. Радіочастотний тракт включає кілька компонентів, таких як коаксіальні кабелі, роз'єми та фільтри, всі з яких впливають на загальний імпеданс, що сприймається передавачем. Роль узгодження імпедансу в цьому контексті полягає в тому, щоб забезпечити безперебійну передачу енергії завдяки складній взаємодії цих компонентів, тим самим підвищуючи силу та чіткість сигналу. Без належного узгодження навіть високоякісне радіочастотне обладнання може працювати

неналежним чином, що підкреслює важливість розуміння цих фундаментальних концепцій у проектуванні радіочастот [20].

Досягнення ефективного узгодження антени передбачає використання різних методів та пристроїв, призначених для узгодження різниці в імпедансі. Узгоджувальні мережі є фундаментальними інструментами, серед поширених конфігурацій яких є L-мережі, Т-мережі та Рі-мережі, кожна з яких пропонує певні переваги залежно від застосування. Наприклад, L-мережі, що складаються з послідовної індуктивності та шунтуючого конденсатора, є простими та ефективними для вузькосмугових сценаріїв узгодження. Т-мережі та Рі-мережі забезпечують ширші варіанти пропускної здатності, що дозволяє гнучкіше налаштування на кількох частотах. Трансформатори ліній передачі, такі як чвертьхвильові трансформатори, також використовуються для узгодження імпедансів шляхом перетворення імпедансу, що спостерігається на одному кінці, на бажане значення на іншому, тим самим зменшуючи відбиття та втрати потужності (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Порівняльна характеристика методів узгодження імпедансу в антенно-фідерному тракті

Метод узгодження (Matching Method)	Конфігурація та принцип дії	Переваги та особливості застосування
L-мережа (L-Network)	Найпростіша схема з двох компонентів (послідовна індуктивність та шунтуючий конденсатор).	+ Простота реалізації, мінімальні втрати. - Вузька смуга пропускання, обмежена гнучкість налаштування. Підходить для фіксованих частот.
Т-мережа та П-мережа (Т- / Pi-Network)	Використовують три елементи для створення більш складного фільтра.	+ Ширша смуга пропускання, висока гнучкість у виборі добротності (Q). - Більша складність та габарити. Ідеальні для

		багатодіапазонних систем.
Чвертьхвильовий трансформатор	Відрізок лінії передачі певної довжини (λ/4), що трансформує вхідний імпеданс у бажаний.	+ Ефективне зниження відбиттів без дискретних компонентів. - Залежить від фізичної довжини хвилі (геометричні обмеження). Часто використовується у мікросмужкових антенах.
Адаптивне (автоматичне) узгодження	Система з сенсорів, мікропроцесора та змінних реактивних елементів для динамічного налаштування.	+ Корекція імпедансу в режимі реального часу при зміні оточення (погода, рух). - Висока вартість та складність конструкції. Критично важливо для автомобільних систем.

Крім того, регульовані узгоджувальні елементи, такі як настроювані конденсатори та індуктори, дозволяють технікам точно налаштувати систему для оптимальної продуктивності, особливо коли змінюються фактори навколишнього середовища або положення антени. Ці методи разом сприяють мінімізації втрат сигналу, забезпечуючи ефективну передачу радіочастотної енергії з мінімальними втратами.

Наслідки невідповідності імпедансу в радіочастотних системах є серйозними, в першу чергу проявляються у збільшенні відбиттів сигналу та втрат потужності, що погіршують загальну продуктивність системи. Коефіцієнт відбиття, міра частки потужності, відбитої назад до джерела, безпосередньо корелює з тяжкістю невідповідності. Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН), отриманий з коефіцієнта відбиття, кількісно визначає цю невідповідність і є критичним параметром у діагностиці радіочастотних систем. Високий КСХН вказує на значні відбиття, які не тільки зменшують чисту потужність, що подається на антену, але й можуть спричинити перегрів та пошкодження компонентів передавача. Наприклад, КСХН вище 2:1 зазвичай вважається неприйнятним у більшості практичних систем, оскільки це свідчить про суттєве відбиття потужності. Ця невідповідність призводить до зниження випромінюваної

потужності, погіршення якості сигналу та збільшення системного шуму, що негативно впливає на надійність зв'язку. Тому підтримка низького КСХН шляхом належного узгодження імпедансу є важливою для оптимальної роботи радіочастотної системи, забезпечуючи потужність, чіткість та ефективну передачу переданих сигналів [21].

Для ефективної мінімізації втрат у радіочастотному тракті першочергове значення мають стратегічні міркування щодо вибору компонентів, якості матеріалів та обслуговування. Вибір високоякісних кабелів та роз'ємів з низькими втратами суттєво впливає на загальну ефективність системи; наприклад, використання кабелів з низькими діелектричними втратами та роз'ємів, розроблених для мінімальних вставних втрат, гарантує, що менше енергії сигналу розсіюється у вигляді тепла або відбиття. Матеріали, що використовуються в лініях передачі та узгоджувальних компонентах, також слід вибирати з урахуванням їхніх властивостей низького затухання, особливо для високочастотних застосувань, де навіть незначні втрати можуть накопичуватися. Регулярне тестування та обслуговування узгоджувальних мереж та радіочастотних компонентів однаково важливі для підтримки оптимальної продуктивності. Такі методи, як аналізатори мереж та вимірювачі КСХН, сприяють постійній оцінці, дозволяючи технікам виявляти та усувати такі проблеми, як корозія, деградація компонентів або неправильне налаштування, перш ніж вони призведуть до суттєвої втрати сигналу. Впровадження суворих протоколів технічного обслуговування в поєднанні з високоякісними матеріалами та компонентами формує комплексну стратегію зменшення втрат радіочастот, забезпечуючи надійний та ефективний зв'язок.

У практичному застосуванні узгодження антен має бути адаптованим до різних типів антен, умов навколишнього середовища та системних вимог, що робить гнучкість ключовим фактором. Різні антени, такі як диполі, монополі або Yagi, мають унікальні характеристики імпедансу, що вимагає спеціалізованих методів узгодження для досягнення бажаного результату. оптимальна продуктивність. Наприклад, антена Yagi може вимагати іншого підходу до

узгодження, ніж вертикальний монополь, через свої спрямовані властивості та профіль імпедансу. Фактори навколишнього середовища, включаючи погоду, сусідні споруди та стан ґрунту, можуть впливати на імпеданс антени та спричиняти коливання продуктивності; таким чином, стратегії узгодження повинні враховувати ці змінні, іноді вимагаючи коригування в режимі реального часу. Балансування складності схем узгодження із загальною ефективністю системи також є вирішальним; надмірно складні мережі можуть запропонувати точне налаштування, але можуть призвести до додаткових вставних втрат або механічної крихкості, тоді як простіші рішення можуть поставити під загрозу оптимальне узгодження імпедансу. Отже, інженери повинні зважувати такі фактори, як простота обслуговування, стабільність навколишнього середовища та потреби в продуктивності, щоб визначити найбільш підходящий підхід до узгодження для кожного конкретного сценарію.

Нещодавні технологічні досягнення сприяють інноваційним рішенням у узгодженні антен, обіцяючи покращену продуктивність та зручність системи. Адаптивні та автоматичні системи узгодження використовують датчики та мікропроцесори для постійного моніторингу умов імпедансу та динамічного налаштування мереж узгодження в режимі реального часу, тим самим підтримуючи оптимальну передачу сигналу навіть при зміні умов навколишнього середовища або експлуатації. Цифрові методи налаштування, включаючи програмно-керовані змінні компоненти, дозволяють виконувати точне та швидке налаштування без ручного втручання, значно скорочуючи час налаштування та підвищуючи надійність. Крім того, нові матеріали, такі як наноматеріали та метаматеріали, пропонують перспективні шляхи для зменшення втрат сигналу завдяки своїм винятковим електричним властивостям. Ці матеріали можна інтегрувати в лінії передачі та антенні конструкції, щоб мінімізувати діелектричні втрати та покращити стабільність імпедансу. У

На завершення, ефективне узгодження антен та мінімізація втрат у радіочастотному тракті є важливими для оптимізації систем бездротового зв'язку. Розуміння основ імпедансу антени, компонентів радіочастотного тракту та

важливості узгодження імпедансу формує основу для проектування ефективних систем. Використання різних методів налаштування, таких як узгоджувальні мережі та трансформатори, допомагає досягти оптимального узгодження імпедансу, зменшуючи відбиття та втрати потужності. Крім того, стратегічний вибір високоякісних матеріалів, регулярне технічне обслуговування та адаптивні технології ще більше підвищують продуктивність системи, мінімізуючи власні втрати та враховуючи зміни навколишнього середовища. Зрештою, комплексний підхід, який поєднує фундаментальні принципи з передовими рішеннями, є життєво важливим для розвитку можливостей бездротового зв'язку у все більш пов'язаному світі.

3. РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АНТЕНИ ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО ЗВ’ЯЗКУ В АВТОМОБІЛІ

3.1. Задачі проєктування та формування вимог до антени

Проектування ефективної антенної системи є критично важливим кроком у розробці систем супутникового зв'язку, оскільки воно безпосередньо впливає на продуктивність, надійність та загальну функціональність системи. Процес постановки завдання проектування та встановлення вимог до антени передбачає всебічне розуміння цільового застосування, робочого середовища та технічних обмежень. Розглядаються основні міркування, пов'язані з визначенням цих параметрів, включаючи тип супутникової системи, режим роботи, діапазон частот та характеристики спрямованості. Ретельно аналізуючи ці фактори, інженери можуть розробляти антени, які відповідають конкретним потребам супутникового зв'язку, забезпечуючи оптимальну якість сигналу, покриття та стабільність [22].

Перший крок у постановці завдання проектування включає визначення призначення та функціональних вимог до антени, які в першу чергу визначаються типом супутникової системи, яку вона підтримує. Супутникові системи можна класифікувати на основі їхніх орбіт, таких як низька навколоземна орбіта (LEO), середня навколоземна орбіта (MEO) та геостаціонарна навколоземна орбіта (GEO). Кожна орбіта створює унікальні проблеми та вимоги; наприклад, супутники LEO, які обертаються на висоті приблизно від 160 до 2000 кілометрів, потребують антен, здатних до швидкого відстеження через їх високий відносного руху. І навпаки, геостаціонарні супутники, розташовані приблизно на висоті 35 786 кілометрів над екватором, мають переваги від фіксованих антен з високим коефіцієнтом посилення, які забезпечують стабільне покриття фіксованих зон. Також необхідно вказати режим роботи антени, чи то виключно для прийому, передачі, чи то для дуплексного режиму, коли одна й та сама антена виконує обидві функції одночасно. Наприклад, наземній станції, яка зв'язується з геостаціонарним супутником, може знадобитися спрямована антена з високим

коефіцієнтом посилення для передачі та прийому, що забезпечує міцний та стабільний зв'язок, незважаючи на стаціонарне положення супутника відносно Землі. Крім того, стабільність зв'язку має підтримуватися навіть під час руху транспортного засобу або супутника; це вимагає надійних можливостей відстеження та керування променем, особливо для мобільних платформ, таких як кораблі чи літаки. Конструкція антени повинна враховувати ці фактори мобільності, щоб запобігти втраті або погіршенню сигналу, що може мати серйозні наслідки для цілісності даних та успіху місії (рис. 3.1).

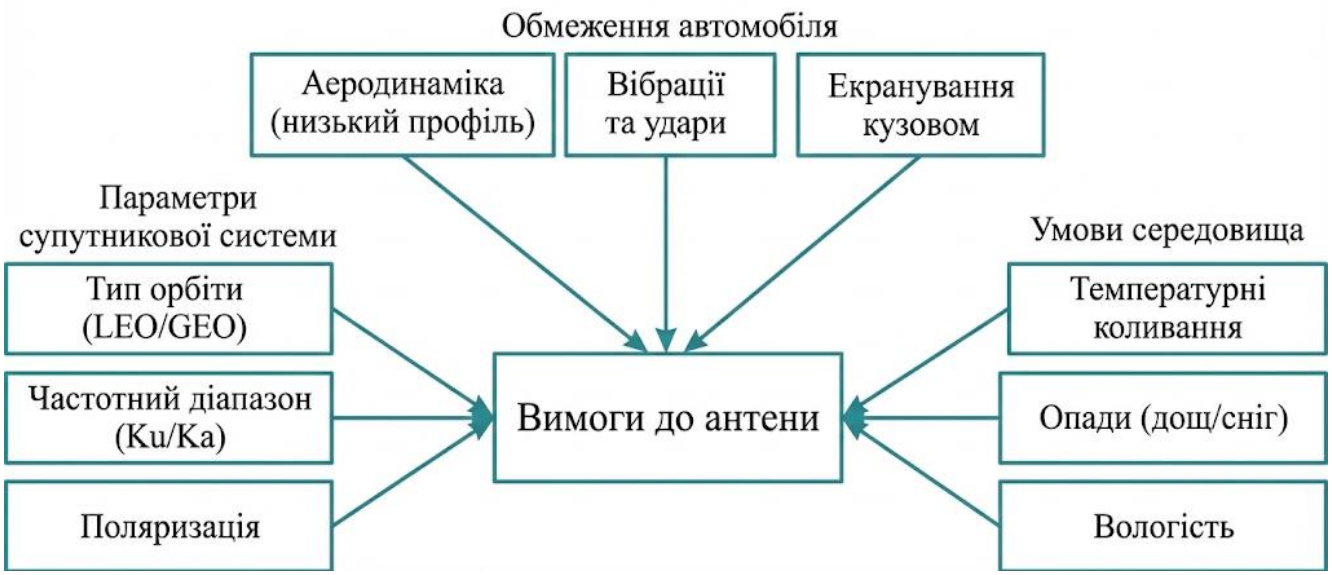


Рис. 3.1. Фактори, що визначають вимоги до конструкції автомобільної супутникової антени

Визначення відповідного робочого діапазону частот є ще одним критичним аспектом встановлення вимог до антени. Вибір діапазонів частот, таких як L, S, Ku або Ka, залежить від потреб конкретної системи, включаючи вимоги до швидкості передачі даних, атмосферні умови та доступні радіочастотні (РЧ) ресурси. Наприклад, частоти Ku-діапазону (приблизно 12-18 ГГц) широко використовуються для супутникового телевізійного мовлення завдяки їхньому сприятливому балансу між пропускною здатністю та атмосферним ослабленням. На противагу цьому, Ka-діапазон (26,5-40 ГГц) пропонує вищу пропускну

здатність, що підходить для високошвидкісних каналів передачі даних, але більш схильний до затухання під впливом дощу, що вимагає надійної корекції помилок та адаптивних схем модуляції. Процес вибору також повинен враховувати обмеження РЧ-спектру, який є обмеженим ресурсом, що регулюється міжнародними організаціями, такими як Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ). Ефективне використання спектру є важливим для уникнення перешкод з іншими системами та забезпечення надійних каналів зв'язку. Крім того, вимоги до пропускної здатності впливають на конструкцію антени, оскільки ширші пропускні здатності вимагають антен з ширшими частотними характеристиками та мінімальною варіацією посилення по всьому діапазону. Це передбачає складні компроміси між розміром, складністю та вартістю антени, особливо коли йдеться про підтримку високопродуктивних програм, таких як широкосмуговий інтернет з космосу [23].

Формування вимог до спрямованості антени є фундаментальним для досягнення цільового покриття та якості сигналу. Коефіцієнт посилення антени, який вимірює концентрацію випромінюваної потужності в певному напрямку, має бути достатнім для подолання втрат на поширення та забезпечення сильного зв'язку. Наприклад, параболічна антена з високим коефіцієнтом посилення може фокусувати енергію на супутнику, мінімізуючи перешкоди та максимізуючи співвідношення сигнал/шум. Ширина основного пелюстка, або ширина променя, визначає кутовий розкид антени та впливає на зону покриття; вужчі промені забезпечують вище посилення та ідеально підходять для цільового зв'язку з певними супутниками або наземними станціями, тоді як ширші промені підходять для регіонального або глобального покриття. Рівні бічних пелюсток однаково важливі, оскільки небажане випромінювання поза основним променем може спричиняти перешкоди та знижувати ефективність системи; таким чином, бічні пелюстки необхідно мінімізувати шляхом ретельного формування антени та проектування обмотки. Крім того, точність наведення супутника — наскільки точно має бути спрямована антена — визначається її спрямованістю. Для антен з високим коефіцієнтом посилення навіть незначні відхилення можуть призвести до

значного погіршення сигналу або його втрати. Наприклад, супутникова антена з шириною променя 1 градус вимагає точних механізмів відстеження для підтримки вирівнювання, особливо в мобільних або динамічних середовищах. У сукупності ці параметри спрямованості повинні бути ретельно визначені на етапі проектування, щоб збалансувати покриття, посилення та складність експлуатації, забезпечуючи надійні та ефективні канали зв'язку.

Під час проектування антен для автомобільного застосування необхідно врахувати кілька спеціалізованих вимог, щоб забезпечити оптимальну продуктивність в рамках обмежень інтеграції в транспортний засіб. Одним з основних міркувань є максимально допустимі розміри та висота профілю антени, оскільки простір у транспортних засобах обмежений, а естетичні міркування є важливими. Антена повинна бути достатньо компактною, щоб бездоганно вписатися в конструкцію транспортного засобу без шкоди для аеродинаміки чи функцій безпеки. Механічна міцність та стійкість до вібрацій є однаково важливими, враховуючи, що транспортні засоби постійно рухаються, піддаються ударам та вібраціям. Компоненти антени повинні бути достатньо міцними, щоб витримувати ці механічні навантаження протягом усього терміну служби транспортного засобу, запобігаючи пошкодженням, які можуть погіршити якість сигналу. Крім того, антена повинна бути розроблена з урахуванням захисту навколишнього середовища, здатною надійно працювати за різних погодних умов. Це включає стійкість до проникнення вологи, пилу та екстремальних температур — від морозу до сильної спеки — без погіршення продуктивності. Використані матеріали повинні бути стійкими до атмосферних впливів та корозії, а корпуси антени повинні герметизувати чутливі електронні елементи, забезпечуючи безперервну роботу, незважаючи на вплив суворих факторів навколишнього середовища. Ці конструктивні міркування є життєво важливими для автомобільних антен, які повинні забезпечувати стабільну якість зв'язку, водночас враховуючи фізичні та екологічні обмеження транспортного засобу.

Узгодження поляризації та врахування ліній живлення мають вирішальне значення для максимізації якості сигналу та ефективності системи в супутникових

та автомобільних системах зв'язку. Тип поляризації — лінійний або круговий — повинен вибиратися на основі вимог застосування, умов навколишнього середовища та характеристик передавального та приймального обладнання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Матриця технічних вимог до проєктованої антени

Категорія вимог	Параметр	Значення / Характеристика	Обґрунтування
Електричні	Робочий діапазон частот	Ku-діапазон (12–18 ГГц) або Ka-діапазон (26.5–40 ГГц)	Баланс між пропускною здатністю та атмосферним загасанням.
	Поляризація	Кругова (RHCP/LHCP)	Мінімізація втрат сигналу при зміні орієнтації авто під час руху.
	Коефіцієнт підсилення (Gain)	Високий (> 15-20 дБі, залежно від орбіти)	Необхідний для компенсації втрат на трасі та забезпечення стабільного лінку.
	КСХН (VSWR)	≤ 2.0 (бажано ≤ 1.5)	Забезпечення максимальної передачі потужності та захист передавача.
Механічні	Профіль та габарити	Низькопрофільна, обтічна форма	Збереження аеродинаміки авто та естетична інтеграція.
	Стійкість до вібрацій	Відповідність автомобільним стандартам	Захист від деформацій та втрати контакту при русі по нерівностях.
Експлуатаційні	Кліматичне виконання	IP67 (Захист від пилу та вологи)	Робота в умовах дощу, снігу та перепадів температур.
	Система трекінгу	Електронна (Phased Array) або механічна	Компенсація динамічних змін положення авто відносно супутника.

Кругова поляризація часто є кращою в мобільних або динамічних сценаріях, оскільки вона зменшує вплив невідповідностей поляризації сигналу, спричинених рухом або обертанням транспортного засобу чи супутника. Правильне узгодження між антеною та лінією живлення, включаючи схему передавача або приймача, є важливим для мінімізації втрат на внесення, відбиттів та коефіцієнтів стоячої хвилі (КСХ). Добре узгоджена лінія живлення забезпечує передачу максимальної потужності з мінімальними втратами, що призводить до підвищення надійності та ефективності з'єднання. Обмеження коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) та втрат у фідері також впливають на вибір компонентів лінії передачі, оскільки високі втрати у фідері або погане узгодження можуть значно погіршити силу сигналу. Таким чином, досягнення оптимального узгодження імпедансу є фундаментальним, часто вимагаючи використання узгоджувальних мереж або тюнерів для адаптації антенної системи до імпедансу передавача або приймача, зменшуючи втрати потужності та покращуючи загальну продуктивність системи. Ці міркування є життєво важливими для проектування антен, які ефективно працюють в рамках обмежень усього ланцюга зв'язку [24].

Вплив конструкції транспортного засобу та умов експлуатації на продуктивність антени не можна ігнорувати, оскільки ці фактори безпосередньо впливають на цілісність та надійність сигналу. Кузов транспортного засобу, включаючи металеві панелі та конструктивні елементи, може спричиняти екранувальні ефекти, які послаблюють передавані або приймані сигнали, що вимагає ретельного розміщення та проектування антени для мінімізації таких перешкод. Конструктивні компоненти також можуть спричиняти багатопроменеве поширення, що призводить до згасання або спотворення сигналу, особливо у складних геометріях транспортних засобів. Динамічні зміни під час руху, такі як прискорення, уповільнення та повороти, змінюють відносне положення антени, що вимагає адаптивних або електронно керованих систем для підтримки вирівнювання із супутниками або наземними станціями. Зовнішні фактори навколишнього середовища, включаючи дощ, сніг, пил та коливання температури, додатково впливають на якість сигналу, викликаючи ослаблення або спричиняючи

тимчасові перебої. Антени, що піддаються впливу зовнішніх умов, повинні бути оснащені захисними обтічниками або корпусами, які захищають чутливі елементи від вологи та сміття, не погіршуючи електромагнітні характеристики. Крім того, вібрація та механічні навантаження, що виникають під час експлуатації транспортного засобу, вимагають надійних монтажних рішень та міцних матеріалів для запобігання перекосам або пошкодженням. Врахування цих зовнішніх впливів на етапі проектування гарантує, що антенна система залишається стійкою та підтримує високоякісні канали зв'язку за різних умов експлуатації. Визначення критеріїв та параметрів ефективності є вирішальним етапом у процесі встановлення вимог до антени, оскільки ці показники безпосередньо впливають на загальну продуктивність та надійність системи зв'язку. [25].

Ключові цільові показники включають коефіцієнт підсилення антени, коефіцієнт стоячої кривої (SCR) та S-параметри, кожен з яких служить важливими орієнтирами для оцінки ефективності конструкції. Коефіцієнт підсилення відображає, наскільки добре антена спрямовує радіочастотну енергію в потрібному напрямку, впливаючи на бюджет каналу та зону покриття; вищий коефіцієнт підсилення зазвичай призводить до сильніших сигналів та покращеної якості зв'язку. SCR, який вимірює узгодження імпедансу між антеною та лінією живлення, вказує на те, наскільки ефективно передається потужність; низьке значення SCR означає мінімальні відбиття та максимальну передачу потужності, що необхідно для зменшення втрат та підвищення ефективності системи. S-параметри надають детальне уявлення про характеристики розсіювання антени, включаючи коефіцієнти відбиття та передачі, що дозволяє інженерам виявляти потенційні проблеми, такі як невідповідності або ненавмисні зв'язки. Поряд з цими цільовими показниками, встановлення допустимих рівнів втрат, таких як затухання в лінії живлення, діелектричні втрати та неефективність випромінювання, є життєво важливим для забезпечення роботи системи в межах прийнятних порогів продуктивності. Також необхідно враховувати рівні перешкод, особливо в переповнених радіочастотних середовищах, щоб

мінімізувати перехресні перешкоди та погіршення сигналу. Крім того, критерії порівняння запропонованої антени з існуючими аналогами забезпечують орієнтир, що дозволяє інженерам порівнювати продуктивність, визначати області для покращення та забезпечувати конкурентну перевагу. Ретельно визначаючи ці параметри ефективності, розробники можуть проводити точне моделювання, що зрештою призводить до створення антен, які відповідають або перевищують очікування системи в реальних застосуваннях.

На завершення, процес постановки завдання проектування та встановлення вимог до антени включає комплексний аналіз кількох взаємопов'язаних факторів. Починаючи з визначення призначення та функціональних характеристик антени, включаючи тип супутникової системи, режим роботи та міркування щодо мобільності, гарантує, що конструкція відповідає цілям місії. Вибір відповідного робочого діапазону частот та смуги пропускання додатково уточнює здатність антени передавати високоякісні сигнали в межах доступного радіочастотного спектру, тоді як міркування спрямованості, такі як коефіцієнт посилення, ширина променя та точність наведення, є життєво важливими для досягнення цільового покриття та ефективності системи. Для автомобільних застосувань додаткові обмеження, такі як розмір, механічна міцність та захист навколишнього середовища, формують фізичну та експлуатаційну конструкцію антени. Узгодження поляризації та оптимізація лінії живлення є важливими для максимізації цілісності сигналу та мінімізації втрат, особливо в динамічних середовищах. Зовнішні впливи, включаючи конструкцію транспортного засобу та погодні умови, повинні бути ретельно пом'якшені для підтримки стабільної роботи. Нарешті, встановлення чітких критеріїв ефективності, таких як коефіцієнт посилення, SCR та S-параметри, дозволяє проводити точне моделювання та порівняння з існуючими рішеннями, гарантуючи, що конструкція антени не тільки відповідає технічним характеристикам, але й пропонує конкурентні переваги. Загалом, систематичний та ретельний підхід до визначення вимог до антени закладає основу для розробки надійних, ефективних та високопродуктивних систем зв'язку, що підходять для широкого спектру застосувань [26].

3.2. Створення конструктивної та електромагнітної моделі антени та результати моделювання

Розробка передових антенних систем для автомобільного застосування вимагає всебічного розуміння як їхніх геометричних, так і електромагнітних характеристик. Оскільки транспортні засоби інтегрують дедалі складніші комунікаційні та сенсорні технології, антени повинні бути ретельно розроблені, щоб відповідати суворим критеріям продуктивності в обмежених просторових середовищах. У цій статті представлено систематичний підхід до створення детальної структурної та електромагнітної моделі автомобільної антени, підкреслюючи важливість геометричної оптимізації, вибору матеріалів та електромагнітного моделювання. Окреслено процес від початкового геометричного формування до остаточного електромагнітного моделювання, з акцентом на результати моделювання, які підтверджують вибір конструкції. Кінцевою метою є створення надійної системи моделювання, яка забезпечує оптимальну продуктивність антени, дотримуючись фізичних та експлуатаційних обмежень автомобільної платформи [27].

Фундаментальний крок у моделюванні антени включає формування точного геометричного представлення структури антени, зосереджуючись, зокрема, на елементах апертури або решітки, які є критично важливими для характеристик випромінювання. Визначення форми та розмірів цих елементів вимагає поєднання теоретичного аналізу та емпіричних даних, часто включаючи параметричні дослідження для визначення конфігурацій, які максимізують коефіцієнт підсилення, спрямованість та ширину смуги пропускання. Наприклад, розмір апертури безпосередньо впливає на резонансну частоту та ширину променя антени; отже, для уточнення цих параметрів використовуються ітеративні процеси оптимізації. Крім того, геометрична конструкція повинна враховувати фізичні обмеження, що накладаються автомобільним середовищем, такі як обмежений простір, естетичні міркування та структурна інтеграція, що вимагає балансу між ідеальними електромагнітними характеристиками та практичною реалізацією.

Вибір матеріалів також відіграє ключову роль; матеріали з відповідними електромагнітними властивостями, такими як низькі діелектричні втрати та висока структурна цілісність, вибираються для забезпечення мінімального ослаблення сигналу та механічної міцності. Наприклад, легкі композити з підібраними діелектричними константами можуть бути кращими для зменшення ваги без шкоди для електромагнітної ефективності. Це комплексне геометричне формулювання закладає основу для подальших зусиль моделювання та симуляції. Спираючись на геометричну основу, наступний етап включає розробку детальної моделі випромінювача та фідерного тракту, які є вирішальними для ефективної передачі та прийому сигналу. Вибір типу випромінювача — хвилевід, рупор або мікросмужковий — залежить від конкретних вимог застосування, таких як смуга частот, поляризація та діаграма спрямованості. Мікросмужкові антени, наприклад, пропонують компактний форм-фактор, придатний для інтеграції в автомобільну техніку, але можуть призвести до вищих діелектричних втрат, що вимагає ретельного підбору матеріалів та конструкції. Моделювання ліній електропередач та узгоджувальних мереж передбачає точні розрахунки імпедансу для забезпечення максимальної передачі потужності та мінімальних відбиттів, що є критично важливим для підтримки цілісності сигналу. Узгоджувальні вузли, такі як шлейфові тюнери або узгоджувальні схеми, включені в модель для оптимізації імпедансу в різних точках вздовж живильної мережі. Аналіз втрат у системі фідера — через опір провідника, поглинання діелектриком та витік випромінювання — є важливим для точного прогнозування продуктивності. Такі методи, як аналіз S-параметрів та оцінка тангенса кута втрат, допомагають кількісно визначити ці ефекти, спрямовуючи модифікації конструкції для зменшення неефективності. Крім того, фідерний тракт має бути спроектований таким чином, щоб пом'якшити паразитні ефекти та забезпечити послідовний розподіл фази та амплітуди, що є життєво важливим для досягнення бажаної діаграми спрямованості та коефіцієнта посилення (рис. 3.2).

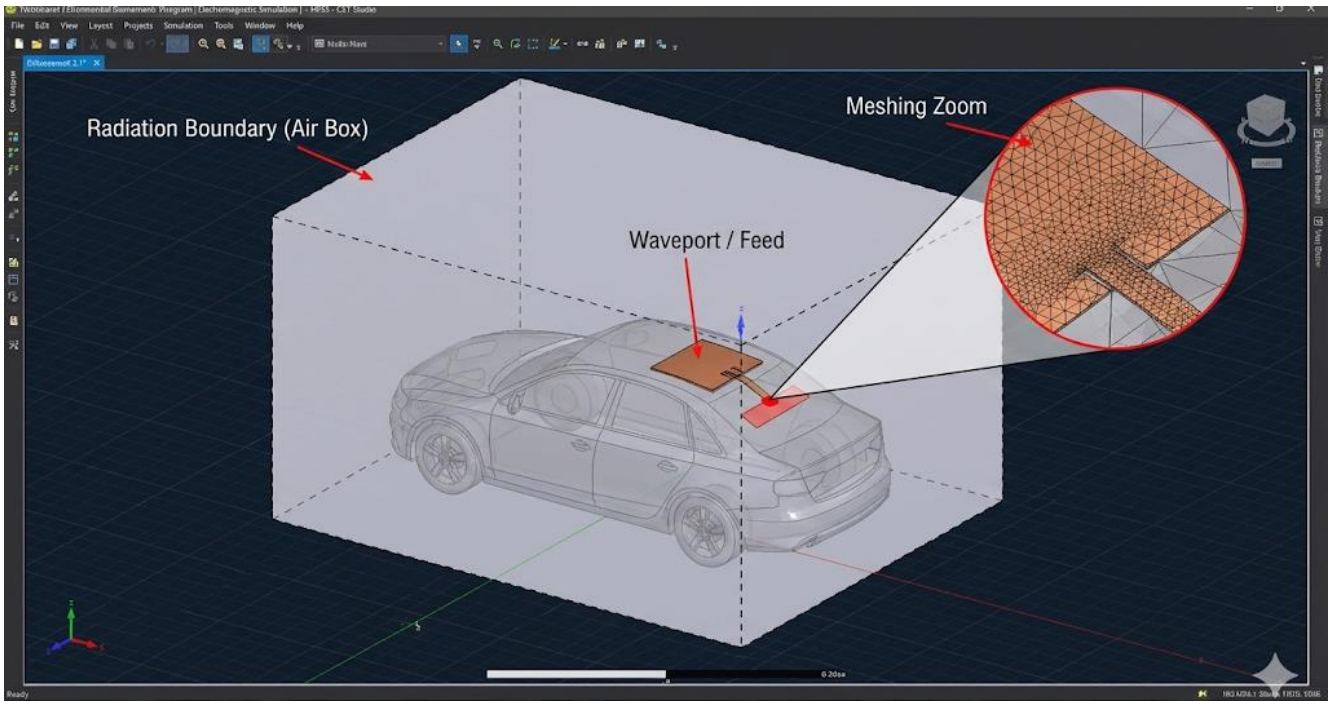


Рис. 3.2. 3D-модель розрахункової області для електромагнітного аналізу антенної системи на автомобілі

Заключний крок включає побудову електромагнітної моделі всієї антенної системи з використанням передових обчислювальних методів для моделювання реальних умов експлуатації. Серед найпоширеніших методів є метод скінченних елементів (МКЕ), метод моментів (МОМ) та метод скінченних різниць у часовій області (ФРЧД), кожен з яких пропонує різні переваги залежно від масштабу та складності проблеми. МКЕ, наприклад, добре підходить для моделювання складних геометрій з неоднорідними матеріалами, що дозволяє детально аналізувати розподіл поля всередині структури антени. МРЧ відмінно підходить для моделювання задач з відкритими межами, таких як антени, вбудовані у вільний простір, забезпечуючи високу точність розподілу поверхневого струму. ФРЧД пропонує рішення в часовій області, які полегшують широкосмуговий аналіз та оцінку перехідної характеристики. Встановлення відповідних граничних умов, таких як поглинаючі межі або ідеально узгоджені шари, має вирішальне значення для запобігання штучним відбиттям, які можуть спотворити результати моделювання. Параметри моделювання, включаючи щільність сітки та діапазон частот, ретельно підібрані для балансування обчислювальної ефективності з

точністю. Більше того, в автомобільному контексті необхідно враховувати електромагнітну взаємодію між антеною та поверхнями транспортного засобу, оскільки металевий корпус транспортного засобу може спричиняти відбиття, розсіювання та невідповідність імпедансу. Ці взаємодії моделюються шляхом включення геометрії та властивостей матеріалів транспортного засобу в область моделювання, що виявляє потенційні області погіршення продуктивності та спрямовує коригування конструкції. Таким чином, електромагнітне моделювання забезпечує всебічне розуміння поведінки антени в її робочому середовищі, що дозволяє оптимізувати її перед створенням фізичного прототипування [28].

Критичним компонентом оцінки продуктивності антени є аналіз параметрів розсіювання, зокрема параметра S11, який вказує на коефіцієнт відбиття в точці живлення антени. Точний розрахунок S11 у всьому робочому діапазоні частот дозволяє визначити резонансну частоту, де S11 досягає свого мінімуму, що означає оптимальне передача енергії між лінією живлення та випромінювальними елементами. Ця резонансна частота є ключовою для забезпечення ефективної роботи антени в межах призначеного діапазону зв'язку. Крім того, смуга пропускання антени, яка визначається як діапазон частот, у якому S11 залишається нижче заданого порогу (зазвичай -10 дБ), оцінюється за допомогою параметричних розгорток у середовищі моделювання. Достатньо широка смуга пропускання забезпечує стійкість до виробничих допусків та коливань навколишнього середовища, які є поширеними в автомобільних застосуваннях. Перевірка на відповідність конкретним вимогам, встановленим стандартами автомобільного зв'язку, такими як КШН (Контекстні стандарти та норми), є важливою для підтвердження відповідності. Ці стандарти часто визначають мінімальну смугу пропускання, втрати на відбиття та інші електричні параметри, яким антена повинна відповідати, щоб гарантувати надійну роботу. Таким чином, ретельний аналіз S-параметрів забезпечує кількісну основу для оптимізації мережі узгодження імпедансу антени, уточнення її фізичних розмірів та забезпечення відповідності остаточного проекту технічним специфікаціям та нормативним обмеженням.

Після електричної характеристики наступний етап включає детальне моделювання діаграми спрямованості та характеристик посилення антени. Побудова як двовимірних (2D), так і тривимірних (3D) діаграм спрямованості сприяє комплексній візуалізації властивостей спрямованості та можливостей формування променя антени. Ці діаграми показують розподіл випромінюваної потужності в просторі, виділяючи ключові особливості, такі як головні пелюстки, бічні пелюстки та нулі. Особлива увага приділяється рівню бічних пелюсток або бічних пелюсток, які є небажаними напрямками випромінювання, що можуть спричиняти перешкоди та знижувати загальну продуктивність системи. Кількісна оцінка рівнів бічних пелюсток допомагає внести зміни до конструкції, спрямовані на придушення цих небажаних випромінювань, тим самим покращуючи якість сигналу та зменшуючи перешкоди для сусідніх систем.

Крім того, коефіцієнт посилення та ефективність антени оцінюються за допомогою моделювання, що дає уявлення про ефективну випромінювану потужність та використання енергії. Високий коефіцієнт посилення вказує на сфокусоване випромінювання в потрібних напрямках, що є перевагою для застосувань зв'язку на великі відстані або зондування. Метрики ефективності враховують втрати потужності в структурі антени, включаючи діелектричні та провідникові втрати, та допомагають визначити області, де вибір матеріалів або геометричні коригування можуть покращити загальну продуктивність. Ці аналізи випромінювання та посилення відіграють важливу роль у перевірці того, що антена не тільки відповідає електричним характеристикам, але й пропонує оптимальне просторове покриття, що відповідає вимогам автомобільної системи. Динамічне середовище експлуатації автомобіля створює додаткові складнощі, які необхідно враховувати при моделюванні антени, зокрема вплив руху транспортного засобу та навколишніх об'єктів. Моделювання змін орієнтації кузова транспортного засобу, таких як тангаж, рисання та крен, дозволяє моделювати, як змінюються діаграма спрямованості та характеристики імпедансу антени під час типових сценаріїв руху. Ці ефекти, що залежать від орієнтації,

можуть призвести до змін резонансної частоти, змін напрямку променя та коливань коефіцієнта посилення, що впливає на надійність зв'язку (табл.. 3.2).

Таблиця 3.2.

Параметри налаштування електромагнітної моделі

Параметр моделювання	Значення / Метод	Обґрунтування вибору
Метод розрахунку (Solver)	FEM (Method of Finite Elements)	Для точного розрахунку складної геометрії та неоднорідних матеріалів.
Граничні умови	Radiation (ABC) / PML	Імітація вільного простору без паразитних відбиттів від стінок віртуального боксу.
Тип збудження (Port)	Waveguide Port / Lumped Port	Узгодження з імпедансом 50 Ом для коректного розрахунку S-параметрів.
Матеріали підкладки	Rogers / FR-4	Забезпечення низьких діелектричних втрат (tanδ).
Критерій збіжності	Delta S < 0.02	Забезпечення точності розрахунку S-матриці.

Крім того, наявність структурних елементів, таких як панелі кузова, бампери та інші металеві компоненти, може спричиняти значні електромагнітні перешкоди, включаючи відбиття, розсіювання та ослаблення сигналів. Аналіз цих взаємодій передбачає включення детальної геометрії транспортних засобів до середовища електромагнітного моделювання, що дозволяє ідентифікувати потенційні мертві зони або області погіршення сигналу. Явища відбиття від металевих поверхонь можуть викликати багатопроменеві ефекти, що призводить до згасання сигналу та збільшення частоти помилок бітів у системах зв'язку. Крім того, моделюється динаміка каналу, така як рухомі об'єкти або фактори навколишнього середовища, такі як пішоходи та інші транспортні засоби, для оцінки їхнього впливу на поширення сигналу. Ці міркування є життєво важливими для проектування надійних антенних систем, здатних підтримувати продуктивність у реальних автомобільних середовищах, де поширені динамічні та багатопроменеві ефекти. Завдяки комплексному моделюванню цих факторів,

антенну систему можна оптимізувати для стабільної роботи, незважаючи на складні та постійно мінливі умови, що виникають під час експлуатації транспортного засобу [29].

Важливим етапом процесу розробки антени є систематичне порівняння результатів моделювання з встановленими технічними вимогами, щоб забезпечити життєздатність та відповідність конструкції. Цей процес перевірки починається з ретельної оцінки ключових параметрів, отриманих в результаті електромагнітного моделювання, таких як коефіцієнти відбиття S11, смуга пропускання, коефіцієнт посилення та діаграми спрямованості. Ці параметри перевіряються відповідно до попередньо визначених специфікацій, викладених у комунікація стандарти та операційні орієнтири, включаючи вимоги, встановлені KShN. Наприклад, змодельована резонансна частота та смуга пропускання повинні відповідати виділеним частотним діапазонам, а коефіцієнт посилення антени повинен відповідати бажаним критеріям покриття та сили сигналу. Під час цього порівняння будь-які відхилення від цільових характеристик ретельно аналізуються, щоб визначити їх першопричини, будь то геометричні неточності, припущення щодо властивостей матеріалів або спрощення граничних умов у моделі. Визнання цих розбіжностей дає змогу внести необхідні корективи, такі як уточнення розмірів апертури, оптимізація мережі живлення або вибір альтернативних матеріалів для покращення електромагнітних характеристик. Цей ітеративний процес гарантує, що модель сходиться до конструкції, яка не тільки теоретично задовольняє технічні критерії, але й готує основу для подальшої експериментальної перевірки. Зрештою, цей порівняльний аналіз надає критичні висновки, які спрямовують перехід від проектування на основі моделювання до фізичного прототипування, гарантуючи, що всі цілі продуктивності досяжні в реальних реалізаціях.

У цій дослідницькій роботі представлено комплексну методологію створення структурної та електромагнітної моделі автомобільної антени, що охоплює кожен етап від початкового геометричного формування до детального електромагнітного моделювання та аналізу продуктивності. Формування

геометричної моделі включало ретельне визначення та оптимізацію розмірів апертури та елементів решітки, враховуючи фізичні обмеження автомобільного середовища та вибір відповідних конструкційних матеріалів для балансування електромагнітної ефективності з механічною стійкістю. Спираючись на цю основу, розробка випромінювача та фідерного тракту була зосереджена на виборі відповідних типів випромінювачів, моделюванні ліній електропередачі та аналізі втрат для забезпечення мінімального погіршення сигналу. Електромагнітне моделювання використовувало передові методи моделювання, такі як FEM, MOM та FDTD, з урахуванням граничних умов та взаємодії поверхонь транспортних засобів для отримання реалістичних результатів. Критичні електричні параметри, включаючи S-параметри та смугу пропускання, були розраховані для перевірки узгодження імпедансу та відповідності технічним стандартам. Аналіз діаграми спрямованості та коефіцієнта посилення надав уявлення про характеристики спрямованості антени, рівні бічних пелюсток та загальну ефективність, тоді як моделювання навколишнього середовища враховувало рух транспортних засобів та навколишні об'єкти, підкреслюючи важливість надійних конструкцій в експлуатаційних умовах. Нарешті, порівняння результатів моделювання з технічними вимогами підкреслило важливість ітеративної оптимізації та визначило області, що потребують уточнення перед переходом до експериментальної перевірки. Загалом, цей систематичний підхід до моделювання створює міцну основу для розробки високопродуктивних автомобільних антен, забезпечуючи відповідність теоретичних результатів практичним критеріям продуктивності та прокладаючи шлях для успішного впровадження в реальних умовах.

3.3. Оцінка ефективності антени в реальних умовах

Ефективність антени є критичним фактором, що впливає на якість та надійність систем бездротового зв'язку, особливо в динамічних середовищах,

таких як транспортні засоби. Хоча теоретичні моделі та симуляції надають цінну інформацію про продуктивність антени, реальні умови створюють складнощі, які можуть суттєво вплинути на експлуатаційну ефективність. Оцінимо ефективність антен, встановлених на транспортних засобах, у реальних умовах експлуатації та запропонувати напрямки для покращення їхньої продуктивності. Аналізуючи експериментальні вимірювання, проведені в статичних та динамічних сценаріях, порівнюючи ці результати з прогнозами моделі та оцінюючи вплив різних факторів, пов'язаних з транспортними засобами, ми можемо визначити ключові проблеми та потенційні рішення для оптимізації продуктивності антени в реальних умовах застосування [30].

Перший крок в оцінці ефективності антени включає проведення комплексних експериментальних вимірювань безпосередньо на транспортному засобі, що охоплюють як статичні, так і динамічні умови випробувань. Статичні вимірювання, що проводяться, коли транспортний засіб нерухомий, служать базовою точкою для розуміння фундаментальних параметрів, таких як коефіцієнт підсилення антени, діаграма спрямованості та узгодження імпедансу в контрольованому середовищі. Ці вимірювання зазвичай використовують безлунні камери або відкриті випробувальні майданчики з точними приладами для реєстрації рівня сигналу та стабільності зв'язку. Однак одних лише статичних випробувань недостатньо для охоплення всього спектру експлуатаційних проблем. Тому динамічні випробування під час руху з різними швидкостями — від повільного міського руху до високошвидкісних умов на автомагістралях — є важливими для моделювання реальних сценаріїв (рис. 3.3). Під час цих випробувань постійний моніторинг сили сигналу, пропускної здатності даних та частоти помилок допомагає визначити, як рух транспортного засобу, швидкість та фактори навколишнього середовища впливають на якість зв'язку. Наприклад, коли транспортний засіб розганяється або сповільнюється, або під час проїзду через тунелі чи міські затори, можуть виникати коливання рівнів сигналу та епізодичні переривання зв'язку. Ці спостереження показують динамічний характер роботи антени та підкреслюють необхідність надійних конструктивних рішень, які

можуть витримувати таку мінливість. Більше того, фіксація впливу різних умов водіння дозволяє дослідникам точно визначити конкретні ситуації, коли продуктивність погіршується, надаючи критично важливі дані для подальшого аналізу та стратегій покращення.

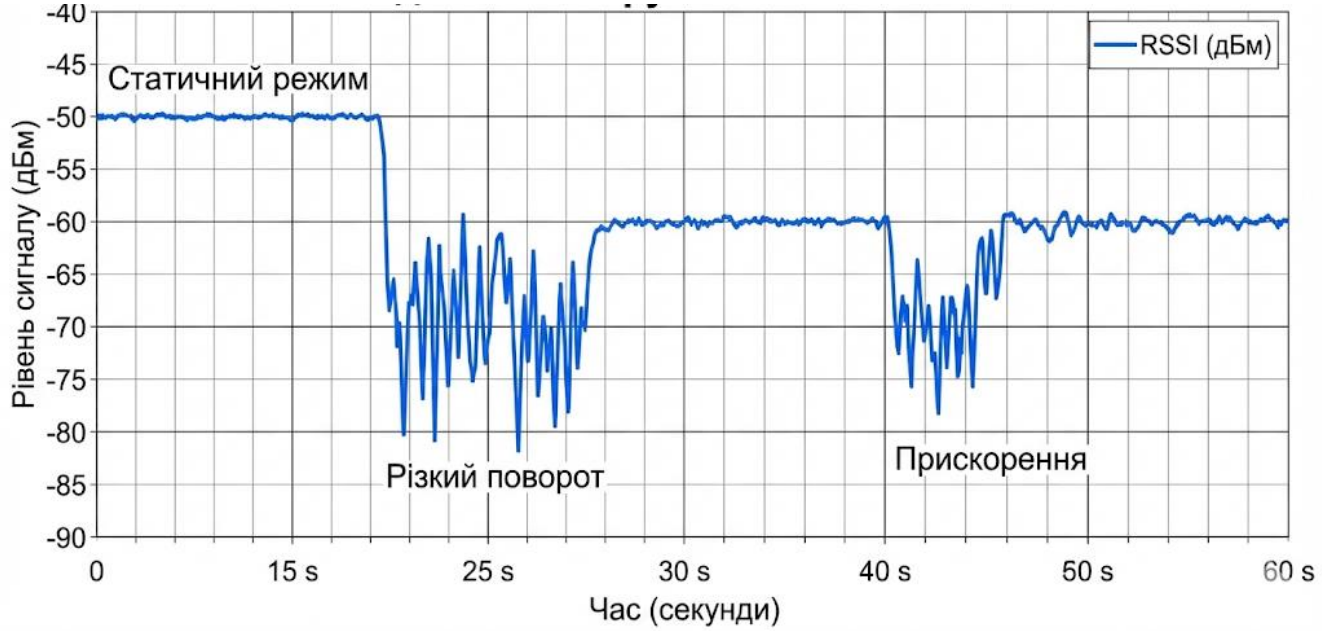


Рис. 3.3. Часова залежність рівня прийнятого сигналу (RSSI) під час маневрування автомобіля

Після збору експериментальних даних вирішальним кроком є порівняння цих емпіричних результатів з прогнозами теоретичних моделей, щоб зрозуміти розбіжності та перевірити точність моделювання. Моделі антен часто використовують ідеалізовані припущення, такі як ідеальні площини заземлення або однорідні умови навколишнього середовища, які рідко справджуються в реальних умовах. Аналізуючи відхилення коефіцієнта посилення, тобто різницю між виміряним та прогнозованим коефіцієнтом посилення антени, дослідники можуть оцінити, якою мірою фактори навколишнього середовища або особливості встановлення впливають на фактичну продуктивність. Наприклад, модель може передбачити певну спрямовану діаграму посилення, але вимірювання можуть показувати значне ослаблення в певних напрямках через близькі об'єкти або особливості транспортного засобу. Оцінка відповідності спрямованих діаграм спрямованості включає накладання виміряних та змодельованих діаграм для

виявлення спотворень або зсувів, спричинених реальними впливами, такими як конструкція кузова транспортного засобу, положення кріплення або близькі металеві компоненти. Крім того, порівняння S-параметрів моделі (параметрів розсіювання) з тими, що отримані з фактичних вимірювань, допомагає виявити невідповідності в імпедансі або ненавмисні резонанси, які можуть погіршити передачу сигналу. Ці відмінності часто виникають через немодельовані ефекти, такі як багатопроменеві відбиття або властивості матеріалів, що підкреслює важливість удосконалення моделей за допомогою емпіричних даних. Визнання цих відхилень допомагає інженерам покращити точність моделювання та налаштувати параметри проектування для кращої відповідності реальним умовам, тим самим підвищуючи загальну надійність та продуктивність антени.

Окрім статичних та моделюючих міркувань, розуміння того, як динамічні робочі фактори впливають на якість зв'язку, є життєво важливим для розробки стійких антенних систем. Коли транспортний засіб повертає або нахиляється, орієнтація антени відносно джерела сигналу змінюється, що часто призводить до погіршення сигналу через невідповідність поляризації або зменшення коефіцієнта посилення в певних напрямках. Наприклад, різкі повороти або нерівна місцевість можуть призвести до відхилення діаграми спрямованості антени від оптимальної орієнтації, що призводить до тимчасового падіння сили сигналу або збільшення частоти помилок. Крім того, елементи кузова транспортного засобу, такі як бампери, багажники на даху або зовнішні антени, створюють перешкоди та ефекти багатопроменевості, які можуть значно погіршити чіткість сигналу. Ці перешкоди, викликані кузовом, генерують відбиття та розсіювання, створюючи складні сигнальні середовища, які ставлять під сумнів здатність антени підтримувати стабільні канали зв'язку. Критичні режими роботи, такі як швидкісні повороти або різкі прискорення, можуть загострити ці проблеми, виявляючи режими, в яких сигнал найбільш вразливий. Аналіз цих динамічних факторів включає детальні польові вимірювання під час різних маневрів транспортних засобів у поєднанні з моніторингом показників зв'язку в режимі реального часу. Визначення режимів та умов, за яких відбувається погіршення сигналу, дозволяє

інженерам розробляти стратегії пом'якшення, такі як адаптивне формування променя, поляризаційне рознесення або механізми переорієнтації антени. Зрештою, розуміння та врахування цих динамічних впливів є важливими для проектування антен, здатних підтримувати високу ефективність та надійність у непередбачуваних умовах, що виникають під час щоденної експлуатації транспортних засобів.

Для візуалізації впливу конструктивних елементів автомобіля на характеристики випромінювання було проведено накладання (суперпозицію) двох діаграм спрямованості: теоретичної, отриманої в результаті електромагнітного моделювання у вільному просторі, та експериментальної, знятої під час натурних випробувань на транспортному засобі (рис. 3.4).

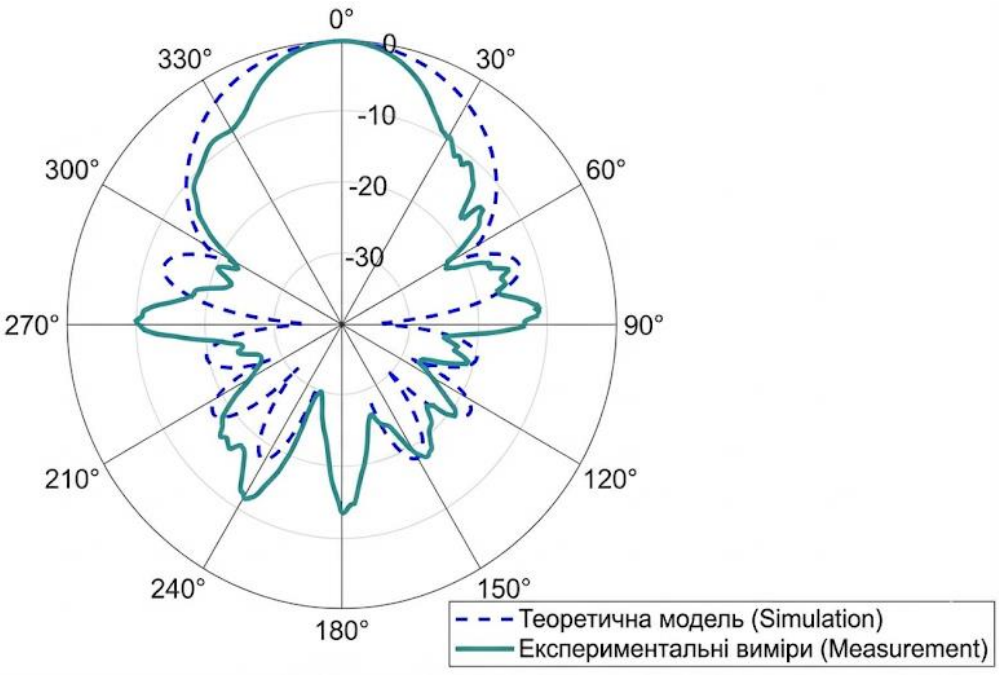


Рис. 3.4. Порівняльний аналіз діаграм спрямованості антени в азимутальній площині

Як видно з наведеного графіку, теоретична діаграма (пунктирна лінія) має симетричну форму з чітко вираженою головною пелюсткою, що відповідає розрахунковим показникам підсилення. Натомість реальна діаграма (суцільна

лінія) демонструє суттєві відхилення від ідеальної моделі. Зокрема, спостерігається деформація головної пелюстки та поява зон значного ослаблення сигналу (до 3–5 дБ) у задній півсфері.

Ці спотворення («сліпі зони») зумовлені екрануючим ефектом металевого даху та стійок кузова, які перекривають лінію прямої видимості в певних кутових секторах. Крім того, характерна «порізаність» експериментальної кривої свідчить про наявність інтерференційних ефектів, викликаних перевідбиттям сигналу від капота та багажника автомобіля. Виявлені аномалії підтверджують необхідність корекції місця встановлення антени або використання методів адаптивного формування променя для компенсації втрат у проблемних секторах.

Ретельна оцінка існуючої конструкції антени, що встановлюється на транспортних засобах, виявляє кілька недоліків, які знижують загальну ефективність та надійність зв'язку. Однією з помітних проблем є перевищення коефіцієнта постійної провідності (SCR) у певних сегментах робочого діапазону частот. Підвищені рівні SCR вказують на погане узгодження імпедансу, що призводить до збільшення коефіцієнтів відбиття та зменшення передачі потужності від передавача до антени. Ця неефективність не тільки зменшує силу сигналу, але й підвищує ризик спотворення сигналу та втрати цілісності даних. Крім того, спостерігається зниження або неоднорідність посилення в діаграмі спрямованості (DS), особливо в певних напрямках, де антена не підтримує стабільну випромінювальну продуктивність (табл. 3.3). Такі аномалії посилення можуть спричиняти сліпі зони або зони слабкого сигналу, погіршуючи зв'язок транспортного засобу під час маневрів або в умовах захараченого середовища. Крім того, аналіз фізичної конструкції антени виявляє елементи, які викликають втрати або екранування. Наприклад, монтажні кронштейни, матеріали корпусу або розташовані поруч металеві компоненти часто створюють паразитні резонанси або поглинають випромінювану енергію, що призводить до зменшення ефективного посилення. Деякі конструктивні особливості також можуть ненавмисно блокувати або відбивати сигнали, посилюючи багатопроменеві перешкоди та знижуючи загальну чіткість. Визнання цих недоліків є критично

важливим, оскільки воно спрямовує цілеспрямовані модифікації, спрямовані на підвищення ефективності антени та забезпечення надійності систем автомобільного зв'язку.

Таблиця 3.3.

Порівняльна характеристика ефективності антени в стаціонарному та мобільному режимах

Параметр (Parameter)	Статичний режим (Static)	Динамічний режим (Dynamic)	Втрати ефективності (Degradation)
Середній рівень сигналу (RSSI)	-65 дБм	-72 дБм	7 дБ
Стабільність посилення (Gain Stability)	±0.5 дБ	±3.0 дБ	Висока варіативність
Коефіцієнт помилок (BER)	10−6	10−4	Зростання на 2 порядки
Макс. КСХН (Max VSWR)	1.2	1.8	Погіршення узгодження

Щоб усунути виявлені недоліки, можна запропонувати кілька стратегічних конструктивних удосконалень для підвищення продуктивності антени без шкоди для естетики чи функціональності транспортного засобу. По-перше, оптимізація геометрії антени, така як регулювання довжини елементів, форми або механізмів живлення, може значно покращити характеристики узгодження імпедансу та випромінювання. Наприклад, використання конічної або фрактальної геометрії може розширити робочу смугу пропускання та зменшити рівні SCR у бажаному діапазоні частот. Крім того, перегляд розподілу потужності та мережі живлення антени може допомогти досягти більш рівномірного посилення та спрямованості. Перегляд вибору матеріалів корпусу та діелектричних матеріалів є не менш важливим; вибір композитів з низькими втратами, стійких до атмосферних впливів або спеціалізованих пластмас може мінімізувати ослаблення сигналу та ефекти екранування, спричинені корпусом. Використання матеріалів з індивідуальними діелектричними властивостями також може точно налаштувати

резонансну частоту та смугу пропускання антени. Крім того, зусилля щодо зменшення профілю або маси антени, такі як інтеграція компактних, легких елементів, є корисними з точки зору аеродинамічних та естетичних міркувань, за умови, що вони не ставлять під загрозу ключові параметри, такі як посилення, смуга пропускання або довговічність. Ці вдосконалення спрямовані на створення більш ефективної та стійкої конструкції антени, придатної для складних умов експлуатації транспортних засобів, тим самим забезпечуючи стабільніші та якісніші канали зв'язку.

Окрім модифікацій фізичної конструкції, впровадження заходів щодо підвищення стабільності супутникового зв'язку є життєво важливим для забезпечення стабільного зв'язку в динамічних умовах руху транспортних засобів. Один з підходів включає внесення змін до системи супутникового стеження, таких як удосконалення алгоритмів, що враховують рух транспортного засобу, його орієнтацію та зміни шляху сигналу. Інтегруючи дані в режимі реального часу від інерціальних вимірювальних блоків (IMU) та GPS, система стеження може динамічно коригувати орієнтацію антени або керування променем для підтримки оптимального вирівнювання із супутниками. Механізми електронної компенсації положення можуть ще більше підвищити цю стабільність; наприклад, адаптивні фазовані антенні решітки, оснащені електронно керованими елементами, можуть швидко змінювати свою діаграму спрямованості без механічного руху, компенсуючи маневри транспортного засобу або порушення навколишнього середовища. Крім того, підвищення стійкості до метеорологічних впливів, таких як дощ, сніг або туман, вимагає використання атмосферостійких матеріалів, нанесення захисних покриттів або використання методів обробки сигналів, таких як рознесений прийом та кодування з корекцією помилок. Ці заходи допомагають пом'якшити несприятливий вплив атмосферних умов, забезпечуючи стабільну якість сигналу та зменшуючи перебої зв'язку за несприятливих погодних умов. Разом ці стратегії спрямовані на створення більш стійкої системи супутникового зв'язку, здатної підтримувати високу стабільність та продуктивність за непередбачуваних умов, що виникають під час експлуатації транспортних засобів.

Спираючись на детальний аналіз існуючих проблем та запропоновані вдосконалення, важливо сформулювати узагальнені рекомендації, спрямовані на вдосконалення антенної системи для ширшого застосування та майбутнього розвитку. Для сприяння успішній інтеграції в серійні транспортні засоби, конструкція повинна пріоритезувати технологічність та економічну ефективність без шкоди для продуктивності. Це включає стандартизацію ключових розмірів, вибір легкодоступних матеріалів, та розробка модульних компонентів, які можна легко зібрати або замінити. Вирішальним кроком є встановлення комплексних вимог до проектування антени наступного покоління, з акцентом на ширшій смузі пропускання, вищій стабільності посилення, зменшених розмірах і вазі, а також підвищеній стійкості до екологічних та експлуатаційних навантажень. Ці вимоги також повинні включати специфікації щодо узгодження імпедансу, контролю поляризації та довговічності в різних кліматичних умовах. Крім того, майбутні дослідження повинні зосередитися на експериментальній перевірці інноваційних геометрій антен, таких як фрактальні або метаматеріальні конструкції, які обіцяють покращені експлуатаційні характеристики. Дослідження передових матеріалів з налаштовуваними діелектричними властивостями та інтеграція інтелектуальних електронних систем, таких як адаптивне формування променя та корекція сигналу в реальному часі, є перспективними напрямками. Крім того, для перевірки стійкості та надійності нових конструкцій слід надати пріоритет широким польовим випробуванням у різних реальних сценаріях, включаючи різні типи транспортних засобів, місцевості та погодні умови. Ці напрямки досліджень відіграватимуть важливу роль у формуванні нового покоління антен, що встановлюються на транспортних засобах, які відповідають вимогливим потребам сучасних систем супутникового зв'язку, забезпечуючи їхню ефективність, стійкість та практичність для широкого розгортання.

На завершення, оцінка ефективності антени в реальних умовах експлуатації транспортних засобів виявляє значні розбіжності між теоретичними моделями та фактичною продуктивністю, головним чином через вплив навколишнього середовища, динаміку транспортного засобу та недоліки конструкції. Статичні та

динамічні вимірювання підкреслюють важливість комплексного тестування для розуміння того, як такі фактори, як рух транспортного засобу, перешкоди від кузова та умови навколишнього середовища, впливають на якість сигналу. Порівняння емпіричних даних з прогнозами моделей підкреслює необхідність удосконалених підходів до моделювання, які враховують реальні складнощі. Розгляд динамічних робочих факторів виявляє критичні режими, де відбувається погіршення сигналу, підкреслюючи необхідність адаптивних та стійких рішень для антен. Виявлення недоліків конструкції, таких як невідповідність імпедансу, неоднорідність посилення та елементи екранування, спрямовує цілеспрямовані вдосконалення, включаючи геометричну оптимізацію, вибір матеріалів та зменшення профілю. Впровадження передових заходів, таких як електронне керування променем, стійкі до атмосферних впливів матеріали та вдосконалені алгоритми відстеження супутників, може значно підвищити стабільність зв'язку. Рухаючись вперед, встановлюючи узагальнені рекомендації щодо проектування, встановлюючи чіткі вимоги до майбутніх версій антен та прагнучи інноваційних дослідницьких напрямків, вирішальним фактором для розробки антен, які є одночасно ефективними та надійними в складних умовах експлуатації транспортних засобів. Зрештою, цілісний підхід, що поєднує експериментальну перевірку, удосконалення моделювання та технологічні інновації, є важливим для оптимізації роботи антени та забезпечення надійного супутникового зв'язку в динамічних середовищах.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності систем супутникового зв'язку в автомобілях. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено такі висновки:

За результатами першого розділу:

1. Аналіз систем: Встановлено, що для забезпечення високошвидкісного мобільного інтернету в автомобілях найбільш перспективними є низькоорбітальні (LEO) супутникові системи (наприклад, Starlink), оскільки вони забезпечують мінімальну затримку сигналу (latency) та глобальне покриття порівняно з геостаціонарними (GEO) системами .

2. Частотний ресурс: Визначено, що оптимальними для використання є діапазони Ku (12–18 ГГц) та Ka (26,5–40 ГГц), які забезпечують необхідну пропускну здатність. Проте вони вимагають застосування ефективних методів компенсації атмосферного загасання (дощ, туман).

3. Вплив середовища: Доведено, що специфічні умови експлуатації автомобіля створюють суттєві перешкоди для зв'язку. Висока швидкість руху викликає доплерівський зсув частоти , а металевий кузов автомобіля та тоновані вікна діють як екран, що послаблює сигнал.

4. Вибір антени: Порівняльний аналіз показав, що для масового впровадження найкраще підходять мікросмужкові (патч) антени завдяки їх низькому профілю та дешевизні , тоді як фазовані антенні решітки є найбільш технічно досконалим рішенням для забезпечення електронного трекінгу супутника без механічного руху .

За результатами другого розділу:

1. Методологія: Обґрунтовано необхідність використання методів комп'ютерного моделювання (FEM — метод скінченних елементів, MoM — метод моментів) для точного розрахунку характеристик антени перед виготовленням прототипу. Це дозволяє врахувати складну геометрію та неоднорідність матеріалів.

2. Параметри оптимізації: Визначено ключові параметри для оптимізації конструкції: коефіцієнт підсилення (Gain), ширину діаграми спрямованості та коефіцієнт стоячої хвилі (КСХН/VSWR). Критичним є забезпечення КСХН на рівні не більше 2:1 для мінімізації втрат енергії у фідерному тракті.

3. Стратегія інтеграції: Розроблено рекомендації щодо розміщення антен (дах, «акулячий плавник», прихований монтаж), які дозволяють мінімізувати екрануючий вплив кузова та зберегти аеродинамічні властивості автомобіля .

4. Матеріали: Показано перспективність використання метаматеріалів та гнучких композитів, які дозволяють створювати компактні антени, адаптовані до криволінійних поверхонь автомобіля.

За результатами третього розділу:

1. Моделювання: Створено конструктивну та електромагнітну модель антени, яка враховує вплив елементів кузова транспортного засобу. Розрахунок S-параметрів (зокрема S11) дозволив визначити резонансну частоту та підтвердити відповідність робочої смуги пропускання вимогам технічного завдання .

2. Динамічні випробування: Експериментальна оцінка в реальних умовах виявила розбіжності між теоретичною моделлю та практикою. Встановлено, що динамічні маневри (різкі повороти, прискорення) призводять до тимчасової деградації рівня сигналу та зростання КСХН через зміну орієнтації антени та багатопроменеві ефекти .

3. Виявлені недоліки: Аналіз показав наявність "сліпих зон" у діаграмі спрямованості через перекриття конструктивними елементами авто та недостатню швидкість адаптації системи трекінгу в моменти різких маневрів .

4. Напрямки вдосконалення: Запропоновано шляхи модернізації системи, зокрема: використання адаптивних алгоритмів формування променя (beamforming) на основі даних від GPS/IMU для передбачення положення супутника, а також застосування фрактальної геометрії випромінювачів для розширення робочої смуги частот.

Виконана робота підтверджує, що створення ефективної автомобільної супутникової антени вимагає комплексного підходу, який поєднує точне електромагнітне моделювання "автомобіль-антена" та впровадження адаптивних алгоритмів керування для компенсації динамічних збурень під час руху.