ВСТУП

Сучасні виклики, пов'язані з проведенням військових операцій, ліквідацією наслідків стихійних лих та роботою у віддалених регіонах, докорінно змінюють вимоги до телекомунікаційних систем. Критично важливою стає необхідність забезпечення гарантованого та надійного обміну інформацією в умовах, де наземна інфраструктура відсутня, зруйнована або недоступна. У таких умовах створення спеціалізованих систем супутникового зв’язку є єдиним ефективним рішенням для організації стабільної комунікації, що не залежить від локальних мереж.

Система спеціалізованого супутникового зв’язку, що розглядається, включає два ключові компоненти:

- Наземний сегмент, який у даному контексті представлений мобільним терміналом із захищеною апаратною частиною, стійкою до екстремальних кліматичних та експлуатаційних умов.
- Космічний сегмент, що забезпечує ретрансляцію сигналу.

Типовий процес організації каналу зв'язку в таких умовах полягає у формуванні висхідного сигналу з урахуванням методів підвищення завадостійкості. Термінал передає дані на супутник, використовуючи сучасні стандарти (наприклад, DVB-S2/S2X), які дозволяють адаптуватися до зміни параметрів каналу.

Основними споживачами таких рішень є підрозділи збройних сил, служби реагування на надзвичайні ситуації, а також підприємства, що виконують завдання у географічно ізольованих районах. Для них критично важливим є не лише факт наявності зв'язку, а й його безперервність та захищеність.

У цій роботі буде детально розглянуто розробку та обґрунтування технічних рішень для створення системи супутникового зв'язку, здатної працювати в екстремальних умовах. Зокрема, буде проаналізовано фактори впливу на надійність каналів, розроблено вимоги до апаратної частини мобільного термінала та сформульовано практичні рекомендації щодо розгортання та експлуатації такої системи.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

1.1 Характеристики екстремальних умов експлуатації та вимоги до систем зв'язку

Організація надійних каналів обміну інформацією є фундаментальною потребою для координації дій у кризових ситуаціях, будь то проведення рятувальних операцій, ліквідація наслідків техногенних катастроф або виконання завдань підрозділами спеціального призначення. У випадках, коли наземна інфраструктура (оптоволоконні лінії, вежі стільникового зв'язку) пошкоджена або відсутня, системи супутникового зв'язку (ССЗ) стають безальтернативним засобом комунікації. Проте, використання стандартного комерційного обладнання у таких сценаріях часто є неможливим через специфіку навколишнього середовища, яку прийнято характеризувати як екстремальні умови експлуатації.

Під екстремальними умовами у контексті телекомунікаційних систем розуміють сукупність дестабілізуючих факторів навколишнього середовища та специфічних режимів роботи, що суттєво перевищують стандартні експлуатаційні параметри побутової електроніки. Ці фактори можна умовно поділити на три основні групи: кліматичні, механічні та електромагнітні [2]. Для наочності класифікацію основних дестабілізуючих факторів наведено зображено рисунку 1.1.

Механічні фактори пов'язані з мобільністю комплексів зв'язку. Транспортування обладнання пересіченою місцевістю, встановлення терміналів на бронетехніку або морські судна створює інтенсивні вібраційні навантаження та удари. Вібрація може призвести до порушення цілісності паяних з'єднань, роз'ємів та деюстирування антенних систем, що критично впливає на енергетичний потенціал лінії зв'язку.

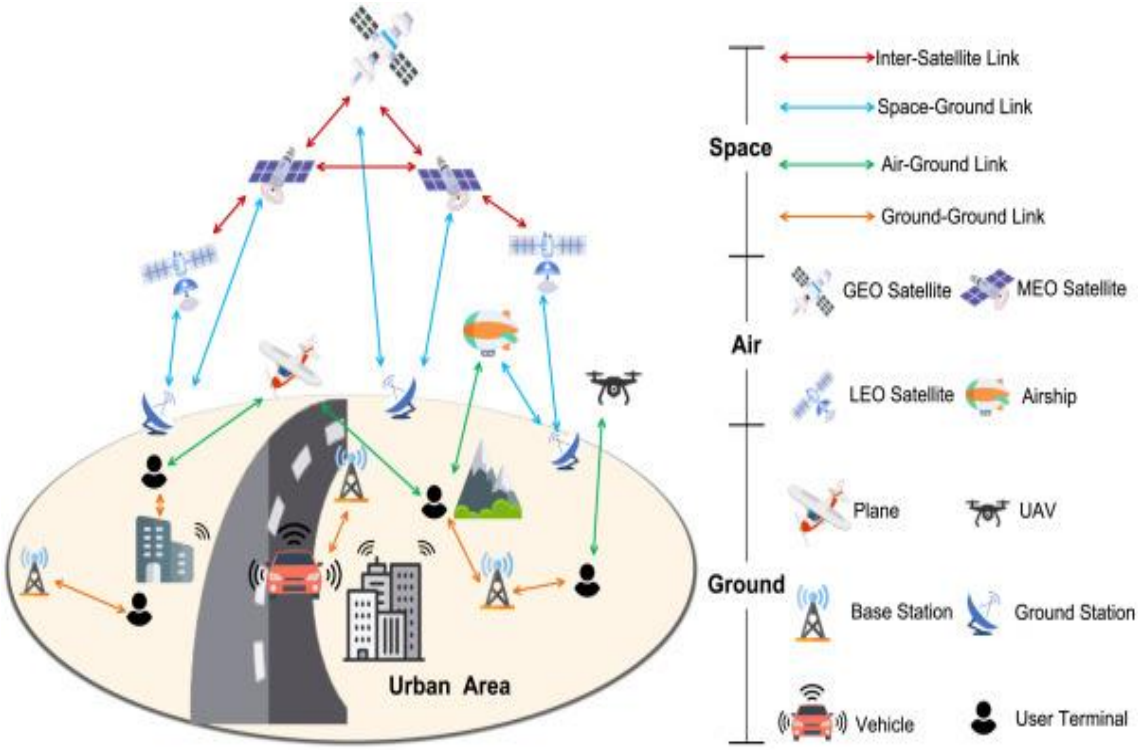


Рис. 1.1 Класифікація дестабілізуючих факторів, що впливають на ССЗ в екстремальних умовах

Кліматичні впливи є найбільш поширеними та включають критичні значення температур, високу вологість, опади та вітрові навантаження. Для обладнання, що розгортається у польових умовах, діапазон робочих температур зазвичай розширюється від -40°C до +55°C (а в окремих випадках до +70°C при прямому сонячному опроміненні). Низькі температури призводять до зниження ємності акумуляторних батарей, загусання мастил у механічних приводах антен та зміни параметрів напівпровідникових елементів. Високі температури, у свою чергу, вимагають ефективних систем активного охолодження, відмова яких веде до перегріву підсилювачів потужності (BUC) та процесорів модемів. Крім того, значний вплив на поширення радіохвиль, особливо у Ku- та Ka-діапазонах, мають гідрометеорологічні явища (дощ, туман, сніг), що викликають загасання сигналу.

Механічні фактори пов'язані з мобільністю комплексів зв'язку. Транспортування обладнання пересіченою місцевістю, встановлення терміналів на бронетехніку або морські судна створює інтенсивні вібраційні навантаження та удари. Вібрація може призвести до порушення цілісності паяних з'єднань, роз'ємів

та деюстирування антенних систем, що критично впливає на енергетичний потенціал лінії зв'язку.

Окремим класом загроз є складна електромагнітна обстановка. В умовах екстремальної експлуатації, особливо у зонах конфліктів, висока ймовірність застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), спрямованих на придушення каналів управління та передачі даних. Це вимагає від ССЗ не лише фізичної витривалості, але й здатності працювати в умовах навмисних завад.

Враховуючи вищезазначені фактори, до систем супутникового зв'язку для екстремальних умов висувається ряд специфічних вимог, які відрізняють їх від цивільних систем типу VSAT. Основні вимоги згруповано та наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння вимог до комерційних та спеціальних систем супутникового зв'язку

Параметр	Комерційні системи (VSAT)	Системи для екстремальних умов
Клас захисту корпусу	IP44 / IP54 (захист від бризок)	IP67 / IP68 (повна герметичність)
Робочий діапазон температур	від 0°C до +40°C	від -40°C до +60°C
Стійкість до вібрацій	Низька (стаціонарне встановлення)	Висока (відповідність MIL-STD-810)
Час розгортання	Години (вимагає спеціаліста)	Хвилини (автоматичне наведення)
Енергоживлення	Стабільна мережа 220В	Автономне (АКБ, 12/24В, сонячні панелі)
Завадозахищеність	Базова або відсутня	Висока (псевдовипадкове перелаштування частоти, адаптивне кодування)

Для формалізації вимог до стійкості обладнання в екстремальних умовах у світовій практиці прийнято використовувати стандартизовані методи випробувань. Еталонним документом, що регламентує процедури перевірки надійності техніки спеціального призначення, є стандарт Міністерства оборони США MIL-STD-810 (у поточній редакції «G» або «H»). Відповідність цьому стандарту є обов'язковою умовою для сертифікації будь-якого мобільного комплексу, призначеного для експлуатації в зонах бойових дій або стихійних лих. Розглянемо детальніше ключові методи випробувань, які є критичними для проектування супутникових терміналів.

Одним із найбільш руйнівних факторів для радіоелектронного обладнання є вібрація, що виникає при транспортуванні. Метод 514.6 (Vibration) стандарту MIL-STD-810G визначає профілі вібраційних навантажень для різних типів носіїв: колісних машин, гусеничної техніки, кораблів та авіації. Для мобільних супутникових комплексів, що встановлюються на бронетехніку, застосовується профіль «Composite Wheeled Vehicle Vibration Exposure», який імітує рух пересіченою місцевістю. Випробування передбачають вплив широкосмугової випадкової вібрації (Random Vibration) у діапазоні частот від 5 Гц до 500 Гц із середньоквадратичним прискоренням (RMS) до 4-5 g протягом тривалого часу. Це вимагає від розробника використання спеціальних амортизаційних підвісів для друкованих плат, фіксації всіх масивних елементів (котушок індуктивності, конденсаторів) компаундами та застосування роз'ємів із гвинтовою фіксацією для запобігання їх самовільному розмиканню [12].

Не менш важливим є випробування на механічний удар згідно з Методом 516.6 (Shock). Цей тест імітує пікові навантаження, що виникають при падінні обладнання, наїзді автомобіля на перешкоду або впливі вибухової хвилі. Процедура «Transit Drop» передбачає серію з 26 падінь термінала у вимкненому стані на бетонну поверхню з висоти 122 см (48 дюймів) на всі грані, кути та ребра. Для успішного проходження тесту корпус пристрою повинен мати внутрішні демпферні зони або зовнішній захисний бампер з еластомеру, а внутрішня компоновка має виключати зіткнення модулів між собою при деформації корпусу.

Також застосовується тест на функціональний удар (Functional Shock) під час роботи пристрою з прискоренням до 40 g тривалістю 11 мс, що перевіряє цілісність паяних з'єднань BGA-мікросхем [15].

Температурні випробування регламентуються Методами 501.5 (High Temperature) та 502.5 (Low Temperature). Специфіка екстремальних умов вимагає перевірки не лише на стабільність роботи при граничних температурах (Operational), але й на здатність витримувати зберігання (Storage) у ще ширшому діапазоні. Для розроблюваної системи критичним є тест на «холодний старт» (Cold Start) при -40°C, коли загусання мастил та зміна ємності електролітичних конденсаторів можуть заблокувати запуск системи живлення. Для проходження цього тесту в схемотехніку закладаються компоненти індустріального або військового (Military) температурного класу, а для критичних вузлів (кварцові генератори, дисплеї) передбачаються локальні нагрівачі.

Окремою групою вимог є захист від потрапляння пилу та вологи, що класифікується згідно з міжнародним стандартом IEC 60529 (код IP). Для екстремальних умов мінімально допустимим рівнем є IP67, а рекомендованим — IP68. Це означає повну пилонепроникність та здатність витримувати тривале занурення у воду на глибину понад 1 метр. Технічна реалізація такого захисту вимагає використання фрезерованих корпусів з алюмінієвого сплаву з прецизійними канавками для силіконових ущільнювачів. Усі зовнішні інтерфейси повинні бути реалізовані через герметичні роз'єми військового зразка (наприклад, серії MIL-DTL-38999). Важливим нюансом конструкції герметичних блоків є встановлення клапана вирівнювання тиску (Breather Valve) з мембраною Gore-Tex. Він дозволяє вирівнювати внутрішній тиск повітря при різких перепадах температур або транспортуванні авіатранспортом, запобігаючи деформації корпусу та всмоктуванню вологи через ущільнювачі, при цьому не пропускаючи воду всередину.

Таким чином, відповідність стандартам MIL-STD-810 та IP68 є не просто формальною вимогою, а базовим інженерним орієнтиром, що визначає вибір

матеріалів корпусу, компонентної бази та технологій монтажу на етапі проектування системи [20].

Ключовим аспектом проектування таких систем є забезпечення балансу між захищеністю та мобільністю. Сучасні тенденції вказують на необхідність переходу від громіздких стаціонарних станцій до компактних переносних (Manpack) або мобільних (Comms-on-the-Move) терміналів, які можуть бути розгорнуті оператором без глибоких технічних знань протягом 5-10 хвилин.

Також критичною вимогою є енергоефективність. В умовах відсутності стаціонарної електромережі система повинна забезпечувати тривалу роботу від портативних джерел живлення. Це диктує жорсткі обмеження на споживання енергії всіма компонентами: від малошумних підсилювачів (LNA) до маршрутизаторів та систем обігріву.

Таким чином, розробка ССЗ для екстремальних умов є комплексною інженерною задачею, яка вимагає інтеграції рішень у галузі радіотехніки, матеріалознавства, схемотехніки та програмного забезпечення.

1.2 Класифікація сучасних систем супутникового зв'язку (GEO, MEO, LEO) та їх можливості

Ефективність функціонування систем супутникового зв'язку в екстремальних умовах значною мірою визначається вибором орбітального угруповання, через яке здійснюється ретрансляція сигналів. Архітектура космічного сегмента диктує вимоги до наземного обладнання, впливає на затримку проходження сигналу, зону покриття та енергетичні параметри лінії зв'язку. Сучасні супутникові системи прийнято класифікувати за висотою орбіти на три основні категорії: геостаціонарні (GEO), середньоорбітальні (MEO) та низькоорбітальні (LEO). Розуміння відмінностей між ними є критичним для проектування мобільних комплексів спеціального призначення.

Геостаціонарні системи (GEO) базуються на супутниках, що знаходяться на висоті приблизно 35 786 км над екватором і обертаються синхронно з Землею. Це

забезпечує їх нерухомість відносно наземного спостерігача, що історично було головною перевагою, оскільки дозволяло використовувати прості фіксовані антени без необхідності систем стеження. Зона покриття одного супутника GEO (глобальний промінь) охоплює близько третини земної поверхні, що дозволяє організувати зв'язок на великих територіях з мінімальною кількістю космічних апаратів [22].

Проте в контексті екстремальних умов експлуатації системи GEO мають суттєві недоліки. По-перше, значна відстань до супутника призводить до великої затримки сигналу (близько 600–800 мс), що ускладнює роботу в реальному часі, наприклад, при дистанційному керуванні роботизованими платформами. По-друге, оскільки супутники розташовані над екватором, кут місця (elevation angle) антени зменшується при наближенні до полюсів. У високоширотних регіонах (вище 70–75° північної або південної широти) зв'язок через GEO стає нестабільним або неможливим через вплив рельєфу та атмосферних перешкод на довгому шляху проходження сигналу зображено на рисунку 1.2.

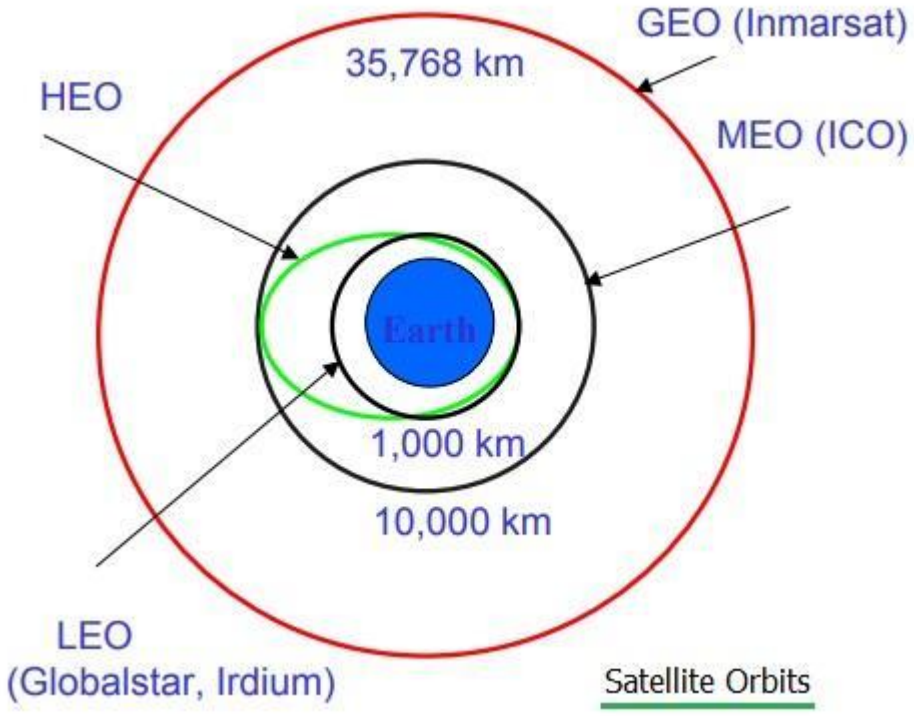


Рис. 1.2 Порівняльна схема орбіт супутникових систем зв'язку (GEO, MEO, LEO)

Середньоорбітальні системи (MEO) розташовуються на висотах від 2 000 до 35 000 км (зазвичай близько 8 000–20 000 км). Вони займають проміжну нішу, пропонуючи меншу затримку порівняно з GEO та більшу зону покриття одного супутника порівняно з LEO. Системи MEO активно використовуються для навігації (GPS, Galileo), а також для високошвидкісної передачі даних (наприклад, система O3b). Для мобільних терміналів робота з MEO вимагає наявності антенних систем, здатних супроводжувати супутник, який повільно рухається по небосхилу, що ускладнює конструкцію термінала порівняно з GEO, але робить її простішою, ніж для LEO.

Низькоорбітальні системи (LEO) є найбільш перспективним напрямком для створення систем зв'язку, що працюють в екстремальних умовах. Супутники LEO знаходяться на висоті від 160 до 2 000 км. Мала відстань до Землі забезпечує мінімальну затримку сигналу (30–50 мс), що співставно з наземними оптоволоконними мережами. Це критично важливо для тактичного зв'язку та управління безпілотними засобами. Крім того, низька орбіта дозволяє зменшити енергетичні втрати при поширенні радіохвиль, що дає змогу використовувати компактні термінали з меншою потужністю передавача та антенами меншого розміру.

Однак висока швидкість руху супутників LEO відносно поверхні Землі вимагає від наземного обладнання здатності швидко перемикатися між супутниками (handover) та постійно відстежувати їх траєкторію. Це зумовлює необхідність використання складних фазованих антенних решіток з електронним скануванням променя. Важливою перевагою сучасних LEO-угруповань (Starlink, OneWeb, Iridium) є можливість забезпечення глобального покриття, включаючи полярні регіони, що є недосяжним для традиційних GEO-систем.

Характеристики розглянутих систем та оцінка їх придатності для використання в екстремальних умовах наведено в порівняльній таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика супутникових систем для екстремальних умов

Характеристика / Параметр	Геостаціонарна орбіта (GEO)	Середньоорбітальна (MEO)	Низькоорбітальна (LEO)
Висота орбіти	~35 786 км	8 000 – 20 000 км	160 – 2 000 км
Затримка сигналу (RTD)	Висока (600–800 мс)	Середня (100–150 мс)	Низька (30–50 мс)
Зона покриття одного КА	Глобальна (1/3 поверхні Землі)	Регіональна	Локальна (сотні км)
Покриття полярних регіонів	Відсутнє або критично низьке	Обмежене (залежить від нахилу)	Повне (Глобальне)
Вимоги до антени	Можливі прості фіксовані або механічні антени	Антени з механічним або електронним супроводом	Складні фазовані решітки (ESA) для швидкого супроводу
Втрати у вільному просторі (FSPL)	Максимальні (>200 дБ)	Середні	Мінімальні (найкраща енергетика)
Робота в русі (COTM)	Ускладнена (потребує громіздких механічних приводів)	Можлива	Оптимальна (швидке перемикання, стійкість до вібрацій)
Вразливість до завад	Висока (нерухомий супутник легко заглушити)	Середня	Низька (швидкий рух супутника ускладнює прицілювання)

Таким чином, для розробки мобільної системи зв'язку спеціального призначення, яка має функціонувати в умовах складної завадової обстановки та забезпечувати роботу в русі, найбільш доцільним є орієнтація на гібридні рішення або використання низькоорбітальних угруповань. Вони забезпечують найкращі показники енергетики радіолінії та мобільності, хоча й висувають підвищені вимоги до технологічності антенних систем.

1.3 Аналіз факторів, що впливають на надійність каналу зв'язку (атмосферні явища, рельєф, радіоелектронні завади)

Надійність функціонування систем супутникового зв'язку в екстремальних умовах безпосередньо залежить від характеристик середовища поширення електромагнітних хвиль. На відміну від дротових каналів, де параметри середовища є стабільними та прогнозованими, супутниковий радіоканал є відкритою системою, що піддається впливу широкого спектра дестабілізуючих факторів. Для забезпечення гарантованої передачі даних критично важливо розуміти фізичну природу цих явищ та враховувати їх при проектуванні енергетичного бюджету лінії. Основними групами факторів, що викликають деградацію сигналу, є атмосферні явища, вплив рельєфу місцевості та радіоелектронні завади [5].

Атмосферні явища мають найбільший вплив на супутникові лінії зв'язку, що працюють у сантиметровому та міліметровому діапазонах хвиль (Ku- та Ka-діапазони), які є основними для сучасних високошвидкісних терміналів. Проходячи крізь товщу атмосфери, радіосигнал зазнає загасання внаслідок поглинання та розсіювання енергії молекулами газів (кисню та водяної пари) та гідрометеорами (дощем, снігом, туманом). Найбільш суттєвим фактором є дощове загасання (rain attenuation). При збільшенні частоти сигналу, коли довжина хвилі стає співмірною з розміром крапель дощу, відбувається інтенсивне розсіювання електромагнітної енергії. Це призводить до різкого падіння відношення сигнал/шум (SNR) на вході приймача, що може викликати повну втрату зв'язку. Крім того, турбулентність атмосфери викликає явище сцинтиляції — швидких флуктуацій амплітуди та фази сигналу, що особливо відчутно при низьких кутах місця антени представлено на рисунку 1.3.

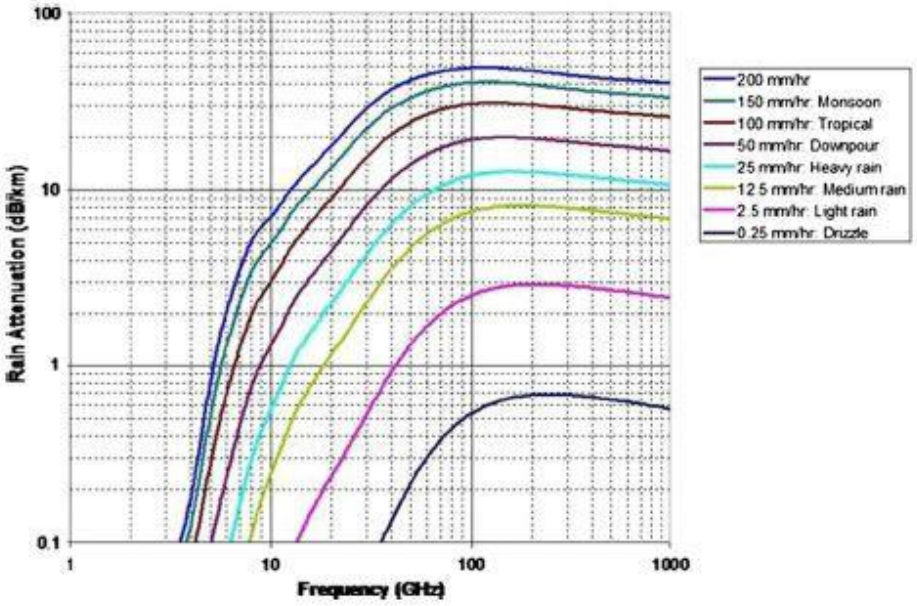


Рис. 1.3 Залежність погонного загасання сигналу від частоти при різній інтенсивності опадів

Другою важливою групою факторів є вплив рельєфу місцевості та підстильної поверхні, що є критичним для мобільних супутникових терміналів (Comms-on-the-Move). При русі транспортного засобу пересіченою місцевістю виникають два основні ефекти: затінення (shadowing) та багатопроменеве поширення (multipath propagation). Затінення відбувається, коли лінія прямої видимості на супутник перекривається перешкодами — горами, деревами або будівлями. Цей ефект є найбільш критичним для геостаціонарних систем у високих широтах, де супутник знаходиться низько над горизонтом. Багатопроменеве поширення виникає внаслідок відбиття сигналу від поверхні землі або навколишніх об'єктів. Приймальна антена отримує не лише прямий сигнал від супутника, але й суму відбитих сигналів з різними фазами, що призводить до інтерференційних завмирань (fading). Глибина таких завмирань може досягати десятків децибел, що вимагає застосування спеціальних методів кодування та запасу по потужності зображено на рисунку 1.4.

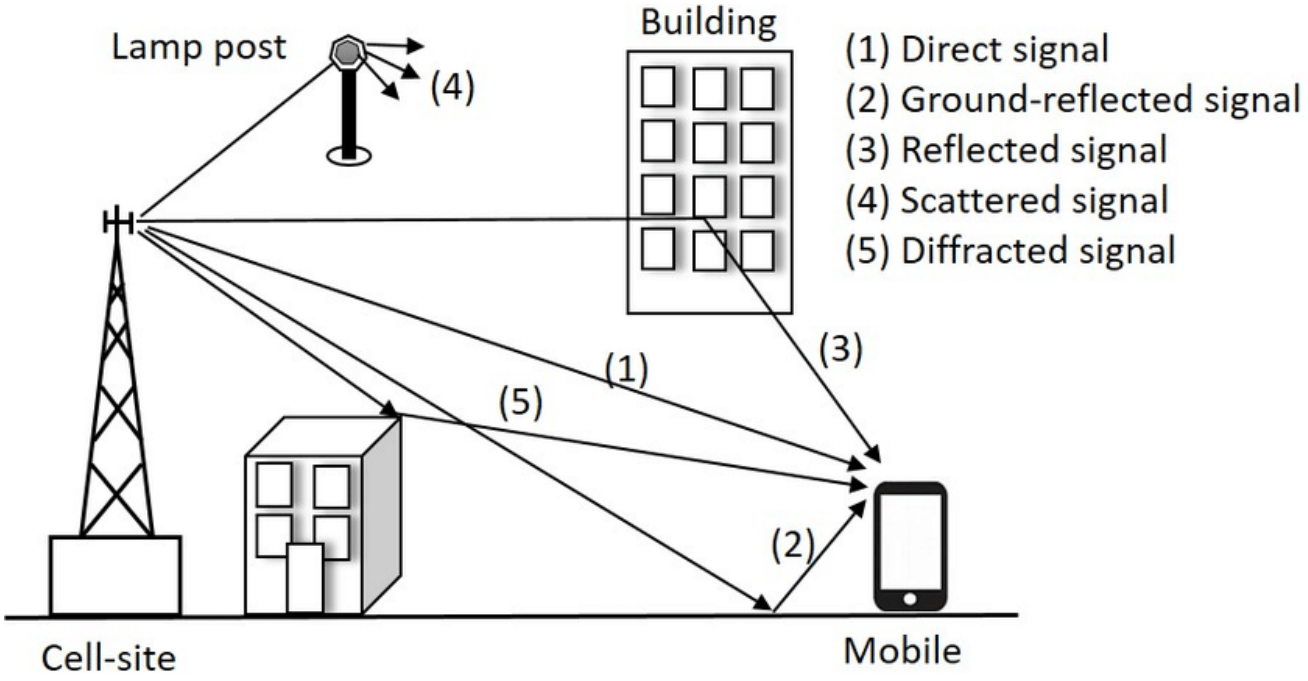


Рис. 1.4 Схема виникнення багатопроменевого поширення сигналу при роботі мобільного термінала

Третім, і найбільш специфічним для екстремальних умов фактором, є радіоелектронні завади. Вони поділяються на ненавмисні (системні) та навмисні (штучні). Ненавмисні завади можуть виникати від сусідніх супутникових мереж (Cross-Polarization Interference, Adjacent Satellite Interference) або наземних радіорелейних ліній. Однак в умовах військових конфліктів або антитерористичних операцій основну загрозу становлять навмисні завади, створювані засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ). Противник може застосовувати постановку завад як на лінії "вгору" (uplink jamming), намагаючись придушити приймач супутника-ретранслятора, так і на лінії "вниз" (downlink jamming), створюючи локальні завади в зоні розташування приймальних терміналів. Такі завади можуть бути широкосмуговими (шумовими) або прицільними (імітаційними), що вимагає від системи здатності до швидкої перебудови частоти та використання завадозахищених сигнально-кодових конструкцій [23].

Розглянуті фактори та методи протидії наведені в узагальнюючій таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Класифікація факторів зниження надійності каналу та методи їх компенсації

Група факторів	Дестабілізуючий фактор	Наслідок впливу на канал	Метод компенсації (технічне рішення)
Атмосферні (Кліматичні)	Інтенсивні опади (дощ, мокрий сніг)	Загасання сигналу (до 10–12 дБ у Ku-діапазоні), підвищення шумової температури	АСМ (Адаптивна модуляція та кодування) – зниження швидкості без розриву зв'язку; UPC (Автоматичне регулювання потужності)
	Обледеніння антени (Wet Radome)	Додаткові втрати на проходження сигналу через обтічник	Інтегрована система активного обігріву поверхні фазованої решітки
Механічні (Рельєф та рух)	Затінення перешкодами (гори, будівлі)	Тимчасова втрата прямої видимості супутника	Використання Mesh-топології (ретрансляція через сусідні термінали) або буферизація даних
	Вібрація та удари при русі	Деюстирування антени, помилки наведення	Використання ФАР (фазованої решітки) з електронним скануванням (відсутність інерційних механічних частин)
	Багатопроменеве поширення	Інтерференційні завмирання (Fading)	Завадостійке кодування (LDPC/BCH) з глибоким перемежовуванням бітів
Електромагнітні (РЕБ)	Прицільні завади (Jamming)	Критичне зниження співвідношення сигнал/шум (C/N+I)	Null Steering (Просторове формування «нуля» діаграми спрямованості в бік завади)
	Перехоплення/Виявлення	Демаскування позиції термінала	DSSS (Розширення спектра) – сигнал "ховається" під рівень шуму; Режим радіомовчання

Таким чином, забезпечення надійності каналу зв'язку в екстремальних умовах вимагає комплексного підходу, що враховує ймовірнісний характер атмосферних явищ, особливості рельєфу в зоні експлуатації та потенційну активність засобів РЕБ. Це диктує необхідність закладання значних енергетичних

запасів при проектуванні радіолінії та використання адаптивних алгоритмів обробки сигналів.

1.3.1 Математичне моделювання загасання сигналу в атмосфері згідно рекомендацій ITU-R

Для точного прогнозування енергетичного бюджету супутникової лінії зв'язку (Link Budget) недостатньо використовувати усереднені значення втрат. Необхідно застосовувати детерміновані та статистичні моделі, рекомендовані Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU-R), які враховують частотний діапазон, кут місця антени та кліматичні особливості регіону експлуатації.

Основним компонентом втрат на трасі «Земля-Космос» є втрати у вільному просторі (Free Space Path Loss — FSPL), які визначаються виключно геометрією лінії зв'язку та частотою сигналу. Їх розрахунок виконується за класичною формулою Фріїса:

$$L_{FSPL} = 20\lg(f) + 20\lg(d) + 32.45$$

,

де

$$f$$

— частота сигналу в МГц,

$$d$$

— похила дальність до супутника в км (Slant Range). Для геостаціонарного супутника та термінала, розташованого на широті Києва (близько 50° пн. ш.), похила дальність становить приблизно 38 000 – 39 000 км, що для частоти 14.5 ГГц (Ku-діапазон, Uplink) призводить до втрат порядку 207 дБ.

Однак в екстремальних умовах критичного значення набувають додаткові втрати, викликані станом тропосфери. Згідно з рекомендацією **ITU-R P.676**, загасання в атмосферних газах (кисень та водяна пара) розраховується як інтеграл від погонного загасання вздовж траси поширення:

$$A_{gas} = \frac{\gamma_o + \gamma_w}{\sin(\theta)}$$

,

де

$$\gamma_o$$

та

$$\gamma_w$$

— питоме загасання в сухому повітрі та водяній парі відповідно (дБ/км),

$$\theta$$

— кут місця антени. Для Ku-діапазону (10–14 ГГц) ці втрати є відносно невеликими (0.3–0.5 дБ) при кутах місця більше 10°, проте вони стрімко зростають при наближенні антени до горизонту.

Найбільш суттєвим фактором деградації сигналу є гідрометеорологічні опади (дощ). Для розрахунку цього впливу використовується методика **ITU-R P.618 «Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems».** Алгоритм прогнозування є багатоступеневим і базується на статистичних даних інтенсивності опадів

$$R_{0.01}$$

(інтенсивність дощу, що перевищується протягом 0.01% часу середнього року).

Крок 1. Визначення ефективної довжини траси в дощі.

Спочатку розраховується висота ізотерми нульової температури (висота дощу,

$$h_R$$

) згідно з ITU-R P.839. Для помірних широт вона зазвичай становить 2.5–3.0 км над рівнем моря. Довжина похилої траси до ізотерми замерзання

$$L_s$$

визначається як:

$$L_s = \frac{h_R - h_s}{\sin(\theta)}$$

,

де

$$h_s$$

— висота наземної станції над рівнем моря.

Крок 2. Розрахунок питомого загасання.

Питоме загасання

$$\gamma_R$$

(дБ/км) залежить від мікроструктури дощу та поляризації хвилі і розраховується за степеневим законом (ITU-R P.838):

$$\gamma_R = k(R_{0.01})$$

,

де коефіцієнти

$$k$$

та

$$\alpha$$

залежать від частоти та кута поляризації. Для частоти 14 ГГц та горизонтальної поляризації ці значення становлять приблизно

$$k \approx 0.03$$

,

$$\alpha \approx 1.15$$

.

Крок 3. Розрахунок горизонтального коефіцієнта редукції.

Оскільки дощ не є однорідним вздовж всієї траси, вводиться коефіцієнт горизонтальної редукції

$$r_{0.01}$$

:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})}$$

,

де

$$L_G = L_s \cos(\theta)$$

— горизонтальна проекція траси.

Крок 4. Розрахунок ефективної довжини траси.

З урахуванням нерівномірності опадів по висоті вводиться коефіцієнт вертикального коригування

$$v_{0.01}$$

, і обчислюється ефективна довжина траси

$$L_E$$

:

$$L_E = L_s \cdot r_{0.01} \cdot v_{0.01}$$

Крок 5. Прогнозування повного загасання.

Загасання в дощі, що не буде перевищене протягом 99.99% часу (тобто для ймовірності 0.01%), становить:

$$A_{0.01} = \gamma_R \cdot L_E$$

(дБ).

Для систем, що працюють в екстремальних умовах, важливо знати значення загасання для інших відсотків часу (наприклад, для доступності 99.7%, що відповідає

$$p \ = \ 0.3\backslash\%$$

). Масштабування виконується за емпіричною формулою:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01}\right)^{-(0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin(\theta))}$$

Розрахунки за цією моделлю показують, що для кліматичної зони E (Україна) при інтенсивності дощу

$$R_{0.01} = 22$$

мм/год загасання на частоті 14 ГГц складає близько 4–5 дБ. Однак для тропічних зон (зона P) або при зливах інтенсивністю до 100 мм/год, це значення зростає до 15–20 дБ, що вимагає застосування методів адаптивної модуляції (АСМ) для утримання каналу зв'язку.

Окремим явищем, яке необхідно враховувати для низькоорбітальних систем та при малих кутах місця, є **тропосферна сцинтиляція** — швидкі флуктуації

амплітуди сигналу, викликані турбулентністю атмосфери. Середньоквадратичне відхилення амплітуди сигналу

$$\sigma_{pre}$$

описується моделлю:

$$\sigma_{pre} = \frac{\sigma_{ref} \cdot f^{7/12} \cdot g(x)}{(\sin\theta)^{1.2}}$$

,

де

$$\sigma_{ref}$$

залежить від вологості повітря та температури (параметр

$$N_{wet}$$

). Хоча енергетичний внесок сцинтиляцій зазвичай не перевищує 0.5–1 дБ, їх динамічний характер може призводити до помилок у роботі петель фазового автопідстроювання частоти (PLL) модема, що вимагає оптимізації параметрів смуги пропускання петлі стеження.

1.4 Огляд існуючих технічних рішень мобільних супутникових терміналів

Сучасний ринок обладнання супутникового зв'язку пропонує широкий спектр технічних рішень, орієнтованих на мобільне застосування. Проте, при розгляді їх крізь призму екстремальних умов експлуатації, коло доступних варіантів значно звужується. Аналіз існуючих терміналів доцільно проводити за критерієм типу антенної системи та способу організації каналу, оскільки саме ці параметри визначають масогабаритні характеристики, енергоспоживання та стійкість до механічних впливів. На сьогодні можна виділити три основні класи мобільних терміналів: портативні термінали L-діапазону, переносні станції VSAT (класу Manpack) та термінали з фазованими антенними решітками (ESA).

Перша група включає компактні пристрої, що працюють у мережах Iridium (сервіс Certus) або Inmarsat (сервіс BGAN). Ці термінали використовують всеспрямовані або малонаправлені антени, що не потребують точного наведення на супутник. Головною перевагою таких рішень є висока мобільність, захищеність корпусу (часто IP67) та низьке енергоспоживання. Однак, обмежена пропускна здатність L-діапазону (зазвичай до 700 кбіт/с) робить їх непридатними для передачі потокового відео високої якості або великих обсягів розвідувальних даних, обмежуючи їх застосування голосовим зв'язком та месенджерами[14].

Друга група — це переносні термінали класу VSAT (Manpack), що працюють у Ku- або Ka-діапазонах. Конструктивно вони являють собою розбірні параболічні антени діаметром 45–90 см, які переносяться в рюкзаку або кейсі. Такі системи забезпечують високу швидкість передачі даних (до десятків Мбіт/с), але мають суттєві експлуатаційні недоліки в екстремальних умовах. По-перше, розгортання та точне наведення антени на геостаціонарний супутник вимагає часу та кваліфікації оператора. По-друге, парусність параболічної антени робить її вразливою до вітрових навантажень, а механічні приводи автосупроводу (у системах Drive-away) є слабкою ланкою при інтенсивних вібраціях зображено на рисунку 1.5.

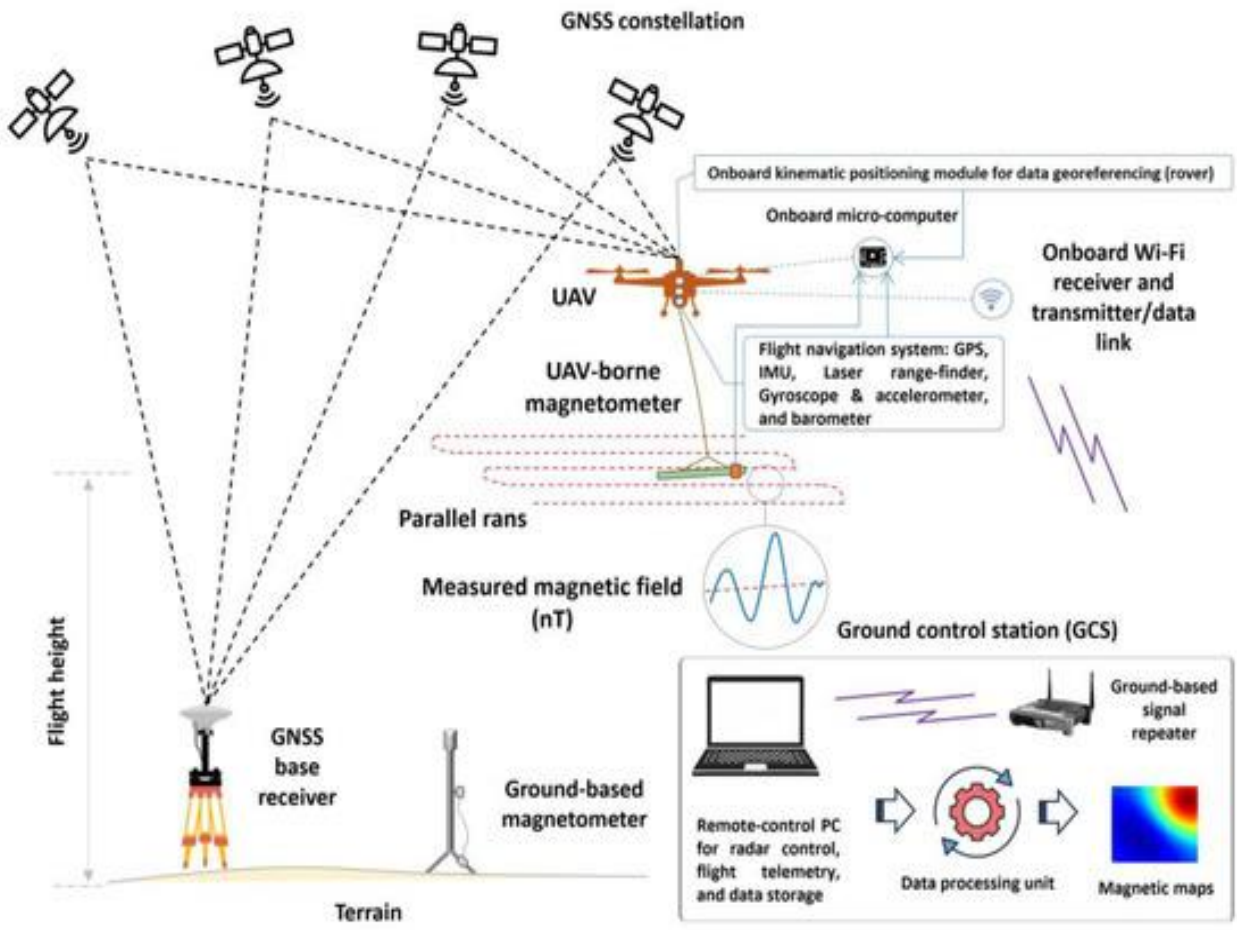


Рис. 1.5 Типова конструкція переносного термінала класу Manpack

Третя, найбільш прогресивна група — це термінали з електронно-керованим променем (Electronically Steered Arrays — ESA), яскраві приклади яких використовуються в системах Starlink або Kymeta. Відсутність рухомих механічних частин забезпечує високу надійність та стійкість до вібрацій, дозволяючи реалізувати повноцінний режим роботи в русі (Comms-on-the-Move). Пласка форм-фактор антени спрощує маскування та інтеграцію на транспортні засоби. Проте, існуючі комерційні версії таких терміналів часто не мають достатнього кліматичного захисту для військового застосування, а спеціалізовані військові версії мають високу вартість та значне енергоспоживання (понад 100 Вт), що ускладнює їх живлення від портативних батарей преставлено на рисунку 1.6.

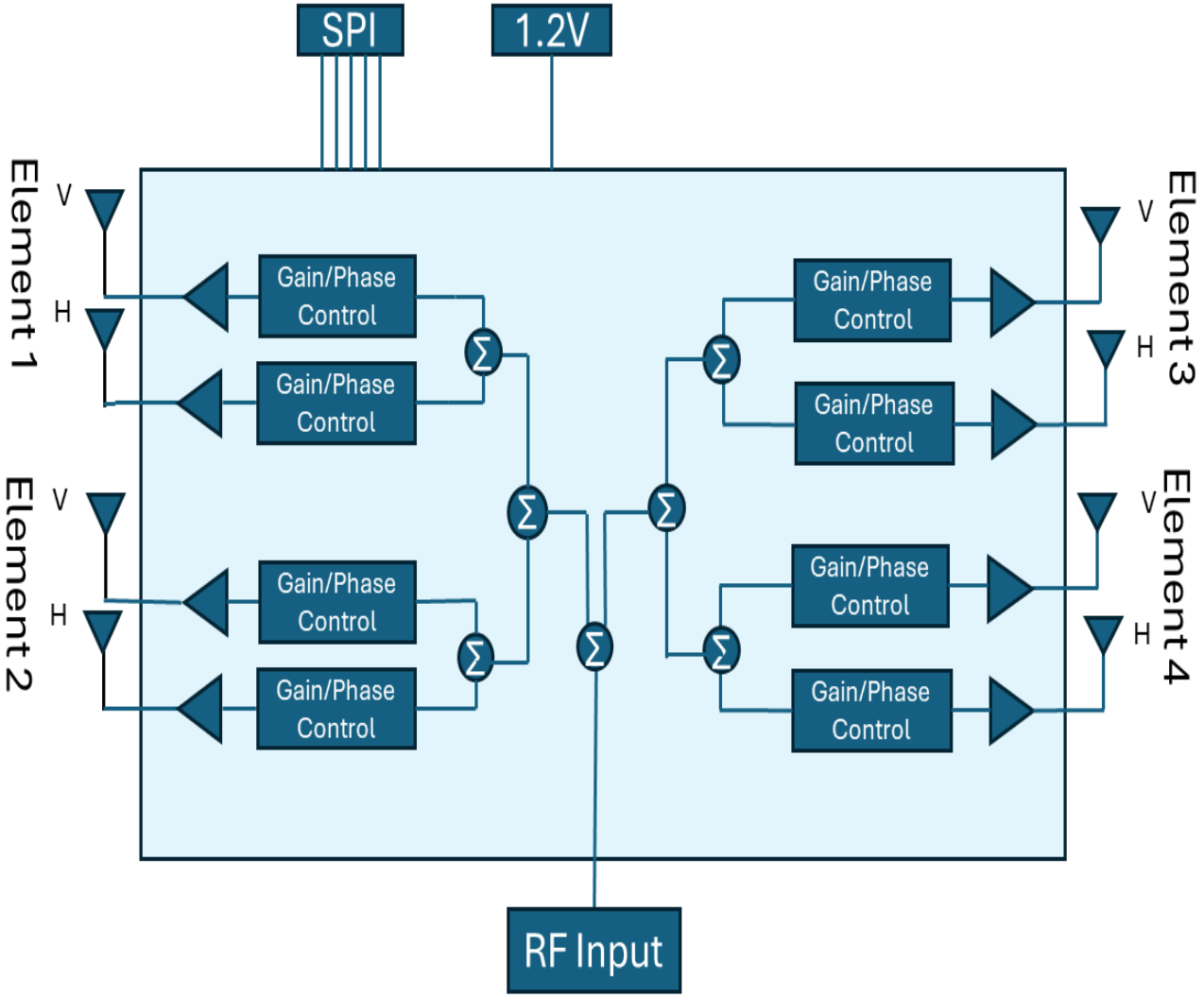


Рис. 1.6 Зовнішній вигляд та структура пласкої антенної решітки для супутникового зв'язку

Критичним параметром для всіх типів терміналів є співвідношення між енергетичним потенціалом та масогабаритними характеристиками (SWaP — Size, Weight and Power). В екстремальних умовах кожен кілограм ваги та кожен ват споживаної енергії мають значення [17-18]. Порівняльний аналіз технічних характеристик типових представників кожного класу наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних мобільних терміналів

Характеристика	Портативні термінали (L-band)	Переносні станції VSAT (Manpack)	Термінали з фазованою решіткою (ESA)
Типові представники	Iridium Certus, Inmarsat BGAN	L3Harris, Cobham Explorer (параболічні)	Starlink, Kymeta u8 (пласкі панелі)
Робочий діапазон	L-діапазон (1.5-1.6 ГГц)	Ku/Ka-діапазон (10-30 ГГц)	Ku/Ka-діапазон (10-30 ГГц)
Тип антени	Всеспрямована або патч-антена	Розбірна параболічна (механічне наведення)	Активна фазована решітка (електронне сканування)
Пропускна здатність	Низька (до 700 кбіт/с)	Висока (до 10-40 Мбіт/с)	Дуже висока (до 100-200 Мбіт/с)
Робота в русі (COTM)	Так (обмежена швидкість даних)	Ні (тільки стаціонарно) або складна механіка	Так (без втрати швидкості)
Час розгортання	< 2 хв	10–15 хв (потребує юстування)	< 5 хв (автоматичне)
Стійкість до вібрацій	Висока	Низька (вразливість механіки)	Висока (відсутність рухомих частин)
Енергоспоживання	Низьке (15–30 Вт)	Середнє (60–100 Вт)	Високе (100–150 Вт)
Вразливість до РЕБ	Середня	Висока (фіксований промінь)	Низька (можливість формування «нулів»)

Аналіз ринку показує, що жодне з існуючих серійних рішень не задовольняє повною мірою сукупності вимог щодо мобільності, пропускної здатності та енергонезалежності в екстремальних умовах. Це обумовлює необхідність розробки гібридних або модифікованих апаратних комплексів, які б поєднували пропускну здатність Ku/Ka-діапазонів з надійністю та автономністю систем L-діапазону.

Висновок до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз особливостей організації супутникового зв'язку в екстремальних кліматичних та експлуатаційних умовах.

Встановлено, що ключовими дестабілізуючими факторами, які впливають на надійність системи, є атмосферні опади (що викликають загасання сигналу в Ku/Ka-діапазонах), складний рельєф місцевості (що призводить до затінення та багатопроменевого поширення) та активна протидія засобами РЕБ.

Аналіз орбітальних угруповань показав, що для забезпечення мінімальних затримок та роботи у високих широтах найбільш перспективним є використання низькоорбітальних систем (LEO), проте це висуває підвищені вимоги до технологічності антенних систем.

Огляд існуючих технічних рішень виявив, що наявні комерційні та спеціальні термінали мають певні обмеження: або низьку пропускну здатність, або недостатню мобільність та механічну стійкість, або надмірне енергоспоживання.

Отримані результати аналізу обґрунтовують доцільність розробки спеціалізованого мобільного комплексу супутникового зв'язку, який поєднуватиме переваги адаптивних методів кодування, стійких до вібрацій антенних систем та енергоефективних алгоритмів роботи, що буде розглянуто у наступних розділах роботи.

2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Вибір архітектури системи для роботи в умовах обмеженої інфраструктури

Проектування архітектури системи супутникового зв'язку для екстремальних умов вимагає фундаментального перегляду традиційних підходів, що застосовуються у цивільних телекомунікаціях. В умовах обмеженої або повністю відсутньої наземної інфраструктури, система повинна володіти властивостями автономності, самовідновлення та гнучкості топології. Вибір архітектури здійснюється на двох рівнях: на рівні організації мережі (Network Topology) та на рівні побудови кінцевого термінала (Terminal Architecture).

На мережевому рівні традиційна топологія «Зірка» (Star), де всі термінали комунікують виключно через центральну земну станцію (Хаб), є вразливою в екстремальних умовах. Вихід з ладу центрального вузла або блокування каналу «термінал-хаб» призводить до повної втрати зв'язку в сегменті. Для забезпечення високої живучості системи доцільно використовувати гібридну архітектуру, що поєднує елементи топологій «Зірка» та «Повнозв'язна мережа» (Mesh). Mesh-топологія дозволяє організувати прямий обмін даними між віддаленими терміналами в один стрибок (single hop), минаючи центральний хаб. Це не лише зменшує затримку передачі сигналу вдвічі (що критично для голосового зв'язку), але й забезпечує збереження локальної зв'язності групи терміналів, що зображені на рисунку 2.1 навіть при втраті доступу до глобальної мережі [6].

Важливим архітектурним рішенням є реалізація багатодіапазонності (Multi-band operation). Система повинна передбачати можливість автоматичного перемикання між частотними ресурсами. Основний трафік передається через високошвидкісні канали Ku- або Ka-діапазонів.

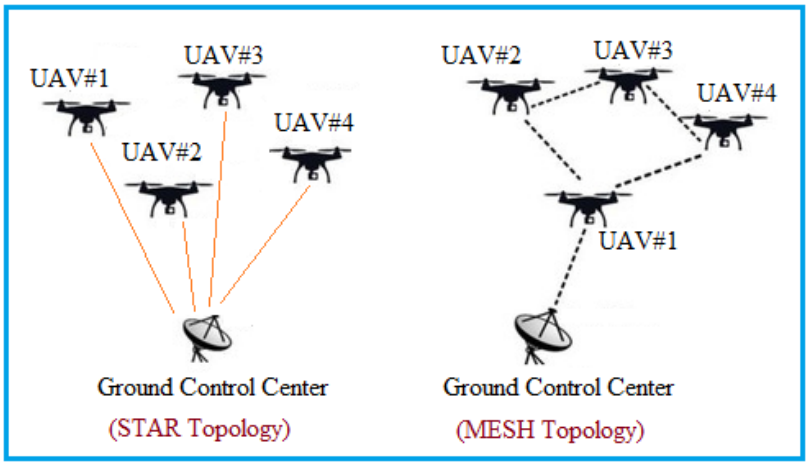


Рис. 2.1 – Порівняння топологій супутникових мереж: «Зірка» (Star) проти повнозв'язної (Mesh)

У випадку критичного погіршення погодних умов (дощ, сніг), які викликають сильне загасання високочастотних сигналів, система повинна автоматично переходити на резервний низькошвидкісний канал L-діапазону (наприклад, Iridium або Inmarsat), який є менш чутливим до атмосфери. Такий підхід гарантує збереження каналу управління та передачі критичних повідомлень за будь-яких умов.

Архітектура кінцевого мобільного термінала повинна будуватися за модульним принципом з чітким розділенням на внутрішній (Indoor Unit – IDU) та зовнішній (Outdoor Unit – ODU) блоки. В умовах обмеженої інфраструктури критичним є мінімізація кількості кабельних з'єднань та спрощення процедури розгортання. Для цього пропонується інтеграція модема та радіочастотного обладнання (BUC/LNA) у єдиний захищений модуль, що розміщується безпосередньо на антені. Це дозволяє уникнути втрат сигналу в довгих коаксіальних кабелях та підвищити енергоефективність системи.

Окрему увагу слід приділити підсистемі електроживлення. В умовах відсутності стаціонарної мережі 220В, архітектура живлення повинна бути гібридною та "всеїдною". Вона має включати інтелектуальний контролер заряду, здатний працювати від бортової мережі транспортних засобів (12/24В),

переносних сонячних панелей та змінних акумуляторних блоків стандартного військового зразка зображено на рисунку 2.2.

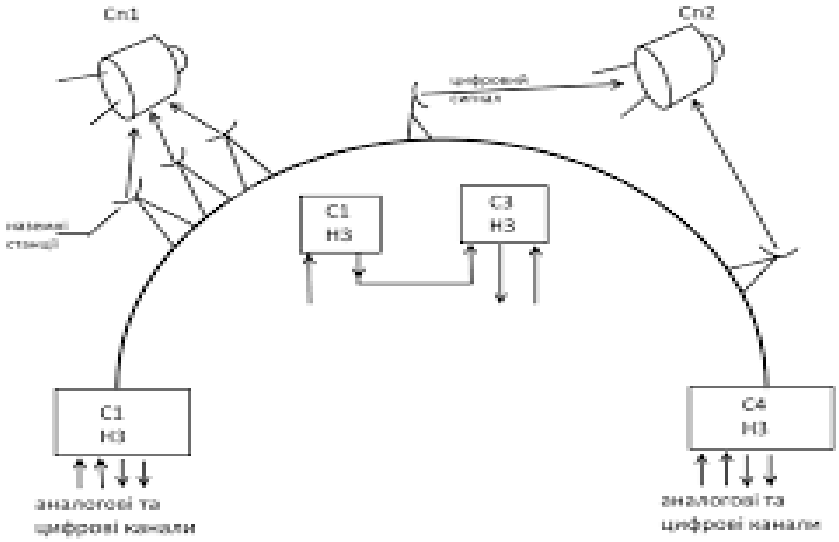


Рис. 2.2 Структурна схема архітектури автономного мобільного термінала

Для забезпечення кіберстійкості архітектура повинна передбачати фізичне розділення каналів передачі даних (Data Plane) та управління (Control Plane). Управління конфігурацією термінала та зміна ключів шифрування повинні здійснюватися через виділений захищений інтерфейс, недоступний із загальної мережі передачі даних. Також система повинна підтримувати локальне кешування даних: при тимчасовій втраті каналу інформація накопичується в буфері термінала і передається автоматично після відновлення зв'язку[7].

Враховуючи високу ймовірність спроб перехоплення або підміни даних в умовах екстремальної експлуатації (зони конфліктів), архітектура системи повинна базуватися на принципах «нульової довіри» (Zero Trust). Це вимагає імплементації надійних криптографічних протоколів на всіх рівнях моделі OSI. Для захисту інформаційного потоку (Data Plane) доцільно використовувати симетричне блокове шифрування за стандартом AES (Advanced Encryption Standard) з довжиною ключа 256 біт. Цей алгоритм на сьогодні вважається стійким до атак із використанням існуючих обчислювальних потужностей, включаючи квантові комп'ютери початкового рівня. Обмін сеансовими ключах здійснюється за асиметричним протоколом Діффі-Геллмана на еліптичних кривих

(ECDH), що забезпечує високу стійкість при меншій довжині ключів порівняно з RSA, знижуючи обчислювальне навантаження на процесор термінала.

Специфіка Mesh-топології, обраної для підвищення живучості мережі, вимагає особливого підходу до маршрутизації. У класичних мережах таблиці маршрутизації є статичними або оновлюються рідко. У мобільній ad-hoc мережі (MANET), де термінали постійно переміщуються, а канали можуть зникати через рельєф, необхідні динамічні протоколи. Для розроблюваної системи пропонується використання протоколу OLSR (Optimized Link State Routing) або його сучасних модифікацій (наприклад, BATMAN-adv). Ці протоколи дозволяють кожному вузлу будувати карту мережі на основі обміну службовими пакетами ("hello messages") з сусідами. Це дозволяє системі автоматично знаходити альтернативний шлях доставки пакетів, якщо прямий канал на супутник заблокований, використовуючи сусідні термінали як ретранслятори.

Крім того, для запобігання несанкціонованому підключенню ворожих терміналів до мережі (атака типу "Rogue Terminal"), впроваджується сувора процедура взаємної аутентифікації. Кожен термінал повинен мати унікальний цифровий сертифікат стандарту X.509, записаний у захищений апаратний модуль (TPM – Trusted Platform Module) на етапі виробництва. При спробі входу в мережу термінал та шлюз обмінюються підписаними "викликами", що гарантує: у мережі працюють лише авторизовані пристрої.

Таким чином, обрана архітектура базується на принципах децентралізації мережевої логіки (Mesh), апаратній надлишковості (багатодіапазонність) та глибокій модульній інтеграції компонентів термінала, що забезпечує необхідний рівень живучості системи в умовах ізоляції від основної інфраструктури.

2.1.1 Аналіз та вибір протоколів маршрутизації для мобільних Ad-Hoc мереж (MANET) супутникового зв'язку

Впровадження Mesh-топології у систему супутникового зв'язку для екстремальних умов трансформує класичну супутникову мережу в динамічну децентралізовану систему, клас якої визначається як MANET (Mobile Ad-hoc NETwork). Головною проблемою таких мереж є нестабільність каналів зв'язку та постійна зміна топології внаслідок руху терміналів або впливу рельєфу. Традиційні протоколи маршрутизації (такі як OSPF або RIP), розроблені для дротових мереж, виявляються неефективними в таких умовах через надлишковий службовий трафік та повільну збіжність (convergence time).

Для забезпечення надійного обміну даними між мобільними терміналами необхідно застосовувати спеціалізовані протоколи проактивної або реактивної дії. В рамках даної роботи пропонується порівняльний аналіз двох найбільш перспективних протоколів: OLSR та BATMAN-adv.

Протокол OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR (RFC 3626) є проактивним протоколом стану каналу (Link State), адаптованим для бездротових мереж. Його ключовою особливістю є механізм оптимізації ретрансляції службових повідомлень (Flooding), який дозволяє суттєво зменшити навантаження на радіоканал.

У класичних протоколах Link State кожен вузол пересилає службові пакети всім своїм сусідам, що призводить до "широкомовного шторму". В OLSR використовується концепція мультипойнтових ретрансляторів (Multipoint Relays — MPR). Кожен вузол незалежно обирає серед своїх сусідів (множина

$$N_1$$

) мінімальну підмножину MPR-вузлів, яка гарантує доставку повідомлення всім вузлам, що знаходяться на відстані двох стрибків (множина

$$N_2$$

).

Математично умову вибору MPR можна записати так:

Множина MPR є такою підмножиною

$$M \subseteq N_1$$

, що:

$$N_2 \subseteq \bigcup_{x \in M} N_1(x)$$

,

де

$$N_1(x)$$

— множина сусідів вузла

$$x$$

.

Використання OLSR дозволяє кожному терміналу мати повну карту топології мережі, що забезпечує миттєву маршрутизацію пакетів без затримок на пошук шляху. Однак, необхідність періодичного обміну повідомленнями TC (Topology Control) та HELLO створює постійне фонове навантаження на канал, навіть якщо корисні дані не передаються.

Протокол BATMAN-adv (Better Approach To Mobile Adhoc Networking)

На відміну від OLSR, протокол BATMAN реалізує принципово інший підхід, децентралізуючи знання про топологію. Вузол у мережі BATMAN не намагається побудувати повну карту всієї мережі. Замість цього він знає лише "найкращого наступного сусіда" (Best Next Hop) для досягнення цільового адресата.

Модифікація BATMAN-adv (Advanced) працює на канальному рівні (Layer 2 моделі OSI), що дозволяє мережі виглядати для верхніх рівнів як віртуальний комутатор (switch). Це спрощує налаштування IP-адресації та підтримує роботу будь-яких протоколів мережевого рівня (IPv4, IPv6, IPX тощо).

Алгоритм роботи базується на розсилці невеликих пакетів OGM (Originator Messages). Якість маршруту визначається не кількістю стрибків (Hop Count), а статистичною ймовірністю успішної доставки пакетів. Це дозволяє уникати маршрутів з високим рівнем втрат, навіть якщо вони коротші.

Метрика якості каналу ETX

Для вибору оптимального маршруту в умовах супутникового каналу з високим рівнем завад критично важливо використовувати метрику, що враховує втрати пакетів. Стандартна метрика "кількість хопів" є неприйнятною, оскільки один "довгий" ненадійний лінк може бути гіршим за два коротких та стабільних.

У розроблюваній системі пропонується використання метрики ETX (Expected Transmission Count) — очікувана кількість передач, необхідна для успішної доставки пакету. ETX розраховується на основі вимірювання якості каналу в прямому (

$$d_f$$

) та зворотному (

$$d_r$$

) напрямках:

$$ETX = \frac{1}{d_f \cdot d_r}$$

де

$$d_f$$

(forward delivery ratio) — ймовірність того, що пакет даних буде успішно доставлений до сусіда;

$$d_r$$

(reverse delivery ratio) — ймовірність того, що пакет підтвердження (ACK) успішно повернеться назад.

Значення

$$d_f$$

та

$$d_r$$

визначаються шляхом аналізу проходження службових HELLO-пакетів за ковзним вікном часу (наприклад, за останні 10 секунд).

Вага маршруту (Route Metric) визначається як сума ETX всіх лінків, що входять до нього:

$$Metric_{path} = \sum_{i=1}^{n} ETX_i$$

Чим менше значення метрики, тим "якіснішим" вважається маршрут. Наприклад, ідеальний канал без втрат має

$$ETX = 1$$

. Канал з 50% втрат пакетів матиме

$$ETX = \frac{1}{0.5 \cdot 0.5} = 4$$

, тобто для доставки одного пакету знадобиться в середньому 4 спроби (включно з ретрансляціями канального рівня).

Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору

Для вибору протоколу маршрутизації мобільного комплексу проведено порівняння характеристик OLSR та BATMAN-adv в контексті специфічних вимог до супутникового зв'язку в екстремальних умовах (Таблиця 2.1).

Таблиця 2.1.

Порівняння протоколів маршрутизації для спеціальних мереж

Характеристика	OLSR (Link State)	BATMAN-adv (Distance Vector)
Рівень моделі OSI	Мережевий (Layer 3)	Канальний (Layer 2)
Знання топології	Повна карта мережі у кожного вузла	Тільки найкращий наступний крок
Службовий трафік	Високий (періодичні TC/HELLO)	Низький (маленькі OGM пакети)
Реакція на мобільність	Середня (потребує перебудови таблиць)	Висока (швидка зміна Next Hop)
Метрика маршрутизації	ETX (розширення RFC)	TQ (Transmission Quality) ~ ETX
Складність конфігурації	Висока (налаштування підмереж IP)	Низька (прозорий міст/Bridge)
Стійкість до петель	Забезпечується нумерацією пакетів	Забезпечується перевіркою Sequence Number

Враховуючи вимогу до мінімізації часу розгортання та необхідність підтримки роботи в русі (Comms-on-the-Move), для розроблюваного комплексу рекомендовано використання протоколу **BATMAN-adv**. Його робота на

канальному рівні дозволяє об'єднувати супутникові термінали, Wi-Fi точки доступу та Ethernet-порти в єдину прозору мережу без складної ієрархії IP-адрес, що спрощує адміністрування в бойових умовах. Крім того, вбудована метрика TQ (Transmission Quality) ефективніше обробляє асиметричні супутникові канали, де швидкість передачі "вгору" і "вниз" може суттєво відрізнятися.

2.2 Методи підвищення завадостійкості: адаптивна модуляція та кодування (ACM)

Забезпечення безперервності зв'язку в умовах, коли параметри каналу передачі даних змінюються динамічно та непередбачувано, вимагає відмови від традиційних статичних методів організації радіолінії. У системах попередніх поколінь (DVB-S) використовувався фіксований тип модуляції та кодування (Constant Coding and Modulation – CCM), розрахований на «найгірший випадок» (наприклад, сильну зливу). Це призводило до того, що значну частину часу пропускна здатність каналу використовувалася неефективно, оскільки значний енергетичний запас залишався незатребуваним. Для систем, що працюють в екстремальних умовах, де енергетичний ресурс є обмеженим, а рівень завад може змінюватися миттєво, ключовою технологією стає адаптивна модуляція та кодування (Adaptive Coding and Modulation – ACM).

Технологія ACM дозволяє змінювати параметри модуляції та схему корекції помилок (FEC) у реальному часі для кожного окремого термінала в мережі, залежно від поточного стану каналу зв'язку. Суть методу полягає у знаходженні оптимального балансу між спектральною ефективністю (швидкістю передачі даних) та завадостійкістю (здатністю декодувати сигнал при високому рівні шуму).

Основою функціонування ACM є набір пар «модуляція-кодування» (MODCOD). Кожен MODCOD характеризується певною вимогливістю до відношення сигнал/шум (SNR). Схеми модуляції низького порядку, такі як QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) або BPSK, є найбільш стійкими до завад, оскільки

символи у сузір'ї знаходяться на великій відстані один від одного, що зменшує ймовірність помилкової детекції. Натомість схеми високого порядку, що зображені на рисунку 2.3 (8PSK, 16APSK, 32APSK) дозволяють передавати більше біт інформації за один символ, але вимагають "чистого" ефіру та високої потужності сигналу[10].

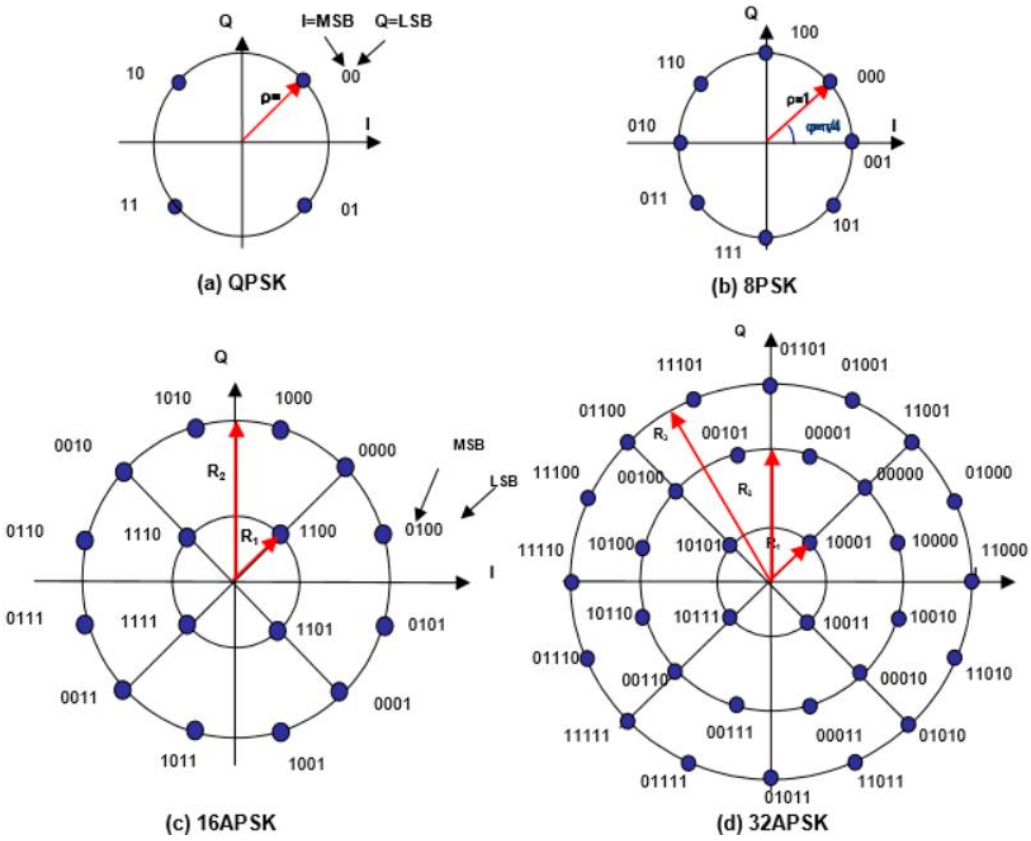


Рис. 2.3 Сигнальні сузір'я для різних типів модуляції (від завадостійкої QPSK до високошвидкісної 32APSK)

Процес адаптації відбувається циклічно. Приймальний термінал постійно вимірює якість сигналу (співвідношення Es/N0) та оцінює рівень бітових помилок. Ця інформація через зворотний канал передається на передавальну станцію (модем або хаб). На основі отриманих даних контролер ACM обирає найбільш ефективний MODCOD, який гарантує квазіпомилкову передачу (Quasi-Error-Free) при поточному рівні шуму. Якщо умови погіршуються (наприклад, починається злива або вмикається джерело РЕБ), система автоматично

переходить на більш низький MODCOD, додаючи надлишкові біти корекції помилок. Швидкість передачі даних при цьому падає, але лінк не розривається.

У сучасних стандартах, таких як DVB-S2 та DVB-S2X, механізм ACM реалізовано з високою гранулярністю. Стандарт DVB-S2X, який є найбільш доцільним для використання в системах спеціального призначення, пропонує розширений набір MODCOD-ів, оптимізованих для роботи з дуже низьким співвідношенням сигнал/шум (VL-SNR). Це дозволяє підтримувати синхронізацію та передавати службові дані навіть при від'ємних значеннях SNR (до -10 дБ), що фактично означає роботу сигналу "під шумом" зображено на рисунку 2.4.

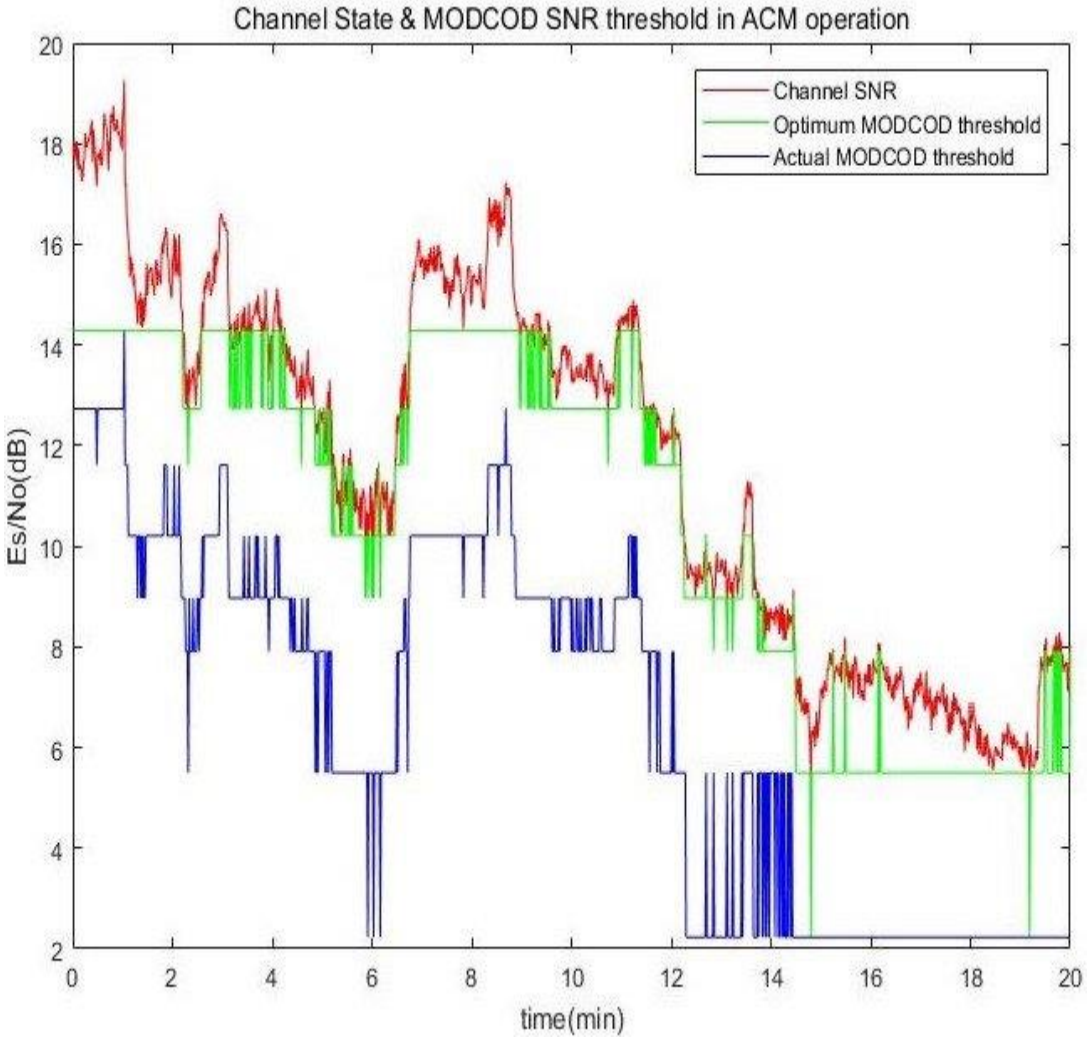


Рис. 2.4 Залежність пропускної здатності каналу від рівня сигнал/шум при використанні технології ACM

Важливим аспектом застосування АСМ в екстремальних умовах є боротьба з ефектом "завмирань" (fading). При русі мобільного термінала рівень сигналу може коливатися з високою частотою. Стандартні алгоритми АСМ можуть не встигати реагувати на швидкі зміни. Тому для мобільних платформ застосовують предиктивні алгоритми, які прогнозують погіршення каналу та знижують модуляцію заздалегідь, щоб уникнути втрати пакетів.

Таким чином, впровадження технології АСМ дозволяє перетворити жорстке обмеження "розрив зв'язку" на гнучку функцію "зниження швидкості". В умовах бойових дій або надзвичайних ситуацій це забезпечує критичну перевагу: можливість передати координати або коротке текстове повідомлення залишається навіть тоді, коли передача відео або голосу стає фізично неможливою через рівень завад.

2.3 Технології антенних систем для мобільних платформ: від параболічних до фазованих решіток

Антенно-фідерна система (АФС) є найбільш критичним та вразливим елементом мобільного супутникового комплексу, оскільки вона забезпечує фізичний інтерфейс між наземним обладнанням та космічним апаратом. В умовах екстремальної експлуатації до АФС висуваються суперечливі вимоги: забезпечення високого коефіцієнта підсилення для підтримки енергетики лінії та мінімізація масогабаритних показників для забезпечення мобільності. Еволюція технічних рішень у цій галузі пройшла шлях від класичних дзеркальних антен з механічним наведенням до передових фазованих антенних решіток з електронним скануванням променя.

Традиційним рішенням для організації супутникового зв'язку є параболічні дзеркальні антени. Принцип їх дії базується на фокусуванні електромагнітної хвилі у точку розміщення опромінювача. Для мобільних платформ (режим Comms-on-the-Move) такі антени встановлюються на гіростабілізовані платформи, оснащені електромоторами для компенсації руху транспортного засобу за кутами

азимута, місця та поляризації. Головною перевагою параболічних антен є висока ефективність апертури та відносно низька вартість. Вони забезпечують найкращий показник співвідношення підсилення до площі антени (G/T). Проте в екстремальних умовах їх використання пов'язане з низкою суттєвих ризиків. Високий профіль антени створює значний аеродинамічний опір та демаскує техніку. Наявність складних електромеханічних вузлів (підшипників, редукторів, пасів) різко знижує надійність системи (показник MTBF) в умовах інтенсивних вібрацій, ударів, запиленості або обледеніння. Крім того, інерційність механічних приводів що представлені на рисунку 2.5 обмежує швидкість супроводження супутників, що робить такі антени малоефективними для роботи з низькоорбітальними (LEO) угрупованнями, де супутник швидко переміщується небосхилом.

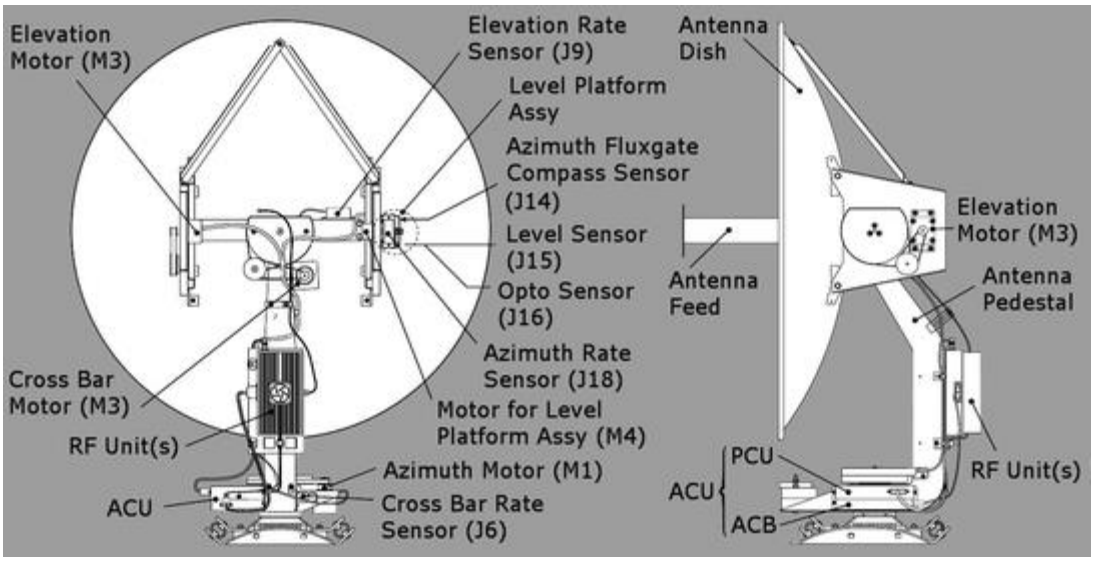


Рис. 2.5 Конструктивна схема гіростабілізованої параболічної антени для рухомих об'єктів

Перехідним етапом розвитку стали низькопрофільні панельні антени з механічним скануванням. Вони використовують масиви випромінювачів (патч-антени або щілинні хвилеводи), об'єднані в пласку конструкцію, яка обертається механічно. Це дозволило покращити аеродинамічні характеристики, але не вирішило проблему надійності механічних вузлів[19].

Якісним стрибком у технологіях супутникового зв'язку стала поява активних фазованих антенних решіток (АФАР) з електронним скануванням (ESA – Electronically Steered Array). У таких системах формування та керування діаграмою спрямованості здійснюється не за рахунок фізичного повороту антени, а шляхом зміни фази сигналу на кожному окремому випромінювальному елементі решітки. Конструктивно така антена є пласкою панеллю, що містить тисячі мініатюрних антенних елементів, кожен з яких оснащений власним фазообертачем та підсилювачем.

Відсутність рухомих частин робить фазовані решітки ідеальним рішенням для екстремальних умов. Вони мають надзвичайно високу стійкість до вібрацій та ударних навантажень. Швидкість перенацілювання променя становить мікросекунди, що дозволяє миттєво перемикатися між супутниками (soft handover) та підтримувати стабільний зв'язок навіть при високоманевреному русі носія (наприклад, на безпілотних літальних апаратах або швидкісних катерах). Крім того, технологія АФАР дозволяє формувати декілька незалежних променів одночасно (Multi-beam capability), забезпечуючи роботу з різними супутниками або в різних діапазонах частот представлені на рисунку 2.6.

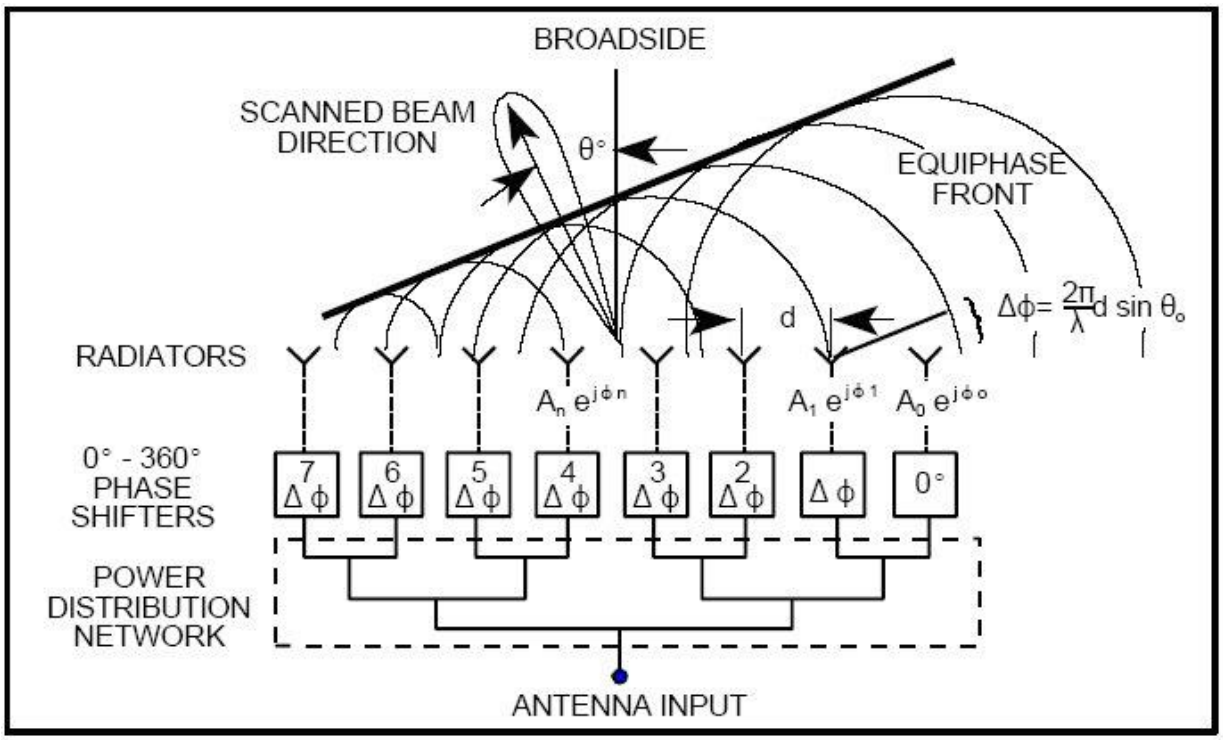


Рис. 2.6 Принцип електронного керування променем у фазованій антенній решітці

Однак, технологія фазованих решіток має і свої обмеження, які необхідно враховувати при проектуванні. По-перше, при відхиленні променя від нормалі (зеніту) відбувається зниження ефективної площі апертури та розширення променя, що призводить до падіння коефіцієнта підсилення (Scan Loss). Це обмежує ефективний сектор огляду антени (зазвичай ±60° від нормалі), що може бути критичним у високих широтах при роботі з геостаціонарними супутниками. По-друге, активні елементи решітки генерують значну кількість тепла, що вимагає ефективної системи термовідведення, збільшуючи загальне енергоспоживання термінала.

Для обґрунтування вибору типу АФС для розроблюваної системи проведено порівняльний аналіз ключових характеристик. Результати наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Порівняння технологій антенних систем для мобільних платформ

Параметр порівняння	Параболічні антени (Reflector Antennas)	Механічні пласкі панелі (Mechanical Flat Panel)	Активні фазовані решітки (AESA / ESA)
Принцип сканування	Механічний поворот дзеркала (електромотори)	Механічний поворот панелі	Електронне сканування (керування фазою сигналу)
Аеродинамічний профіль	Високий (значний опір вітру)	Низький	Дуже низький (інтеграція в корпус)
Стійкість до вібрацій	Низька (вразливість редукторів та підшипників)	Середня	Висока (відсутність рухомих частин)
Швидкість наведення	Низька (обмежена інерцією маси антени)	Середня	Миттєва (мікросекунди, безінерційна)
Робота з LEO-супутниками	Ускладнена (важко відстежувати швидкий рух)	Можлива, але складна	Оптимальна (швидкий handover між супутниками)
Енергоспоживання	Низьке (тільки на приводи)	Середнє	Високе (живлення тисяч активних елементів)
Надійність (MTBF)	Середня (механічний знос)	Середня	Висока (твердотільна електроніка)
Можливість приховання (Visual	Низька (демаскує об'єкт)	Середня	Висока (може бути замаскована під

signature)			елемент кузова)

Новітнім напрямком, покликаним нівелювати недоліки класичних АФАР, є використання метаматеріалів та рідкокристалічних елементів (Metasurface / Liquid Crystal). Ці технології дозволяють створювати пасивні або напівпасивні решітки з електронним керуванням, які мають значно менше енергоспоживання та вартість порівняно з напівпровідниковими аналогами, зберігаючи при цьому переваги відсутності механіки[13].

Таким чином, для забезпечення максимальної надійності та живучості в екстремальних умовах безальтернативним вибором є використання технологій електронного сканування променя. Незважаючи на вищу вартість та енергоспоживання, саме фазовані решітки здатні забезпечити безперервність зв'язку в динаміці та стійкість до механічних руйнувань.

2.4 Методики розрахунку енергетичного бюджету супутникової лінії зв'язку

Енергетичний бюджет радіолінії (Link Budget) є фундаментальним інструментом проектування будь-якої системи супутникового зв'язку, який дозволяє математично оцінити можливість встановлення та підтримки з'єднання із заданою якістю. У контексті розробки системи для екстремальних умов, методика розрахунку виходить за межі стандартного додавання коефіцієнтів підсилення та віднімання втрат. Вона трансформується у комплексний аналіз ризиків, де кожен параметр розглядається з урахуванням найгірших можливих сценаріїв експлуатації (Worst Case Scenario).

Розрахунок енергетичного бюджету проводиться окремо для лінії "вгору" (Uplink: Земля-Супутник) та лінії "вниз" (Downlink: Супутник-Земля). Результуючим показником є відношення потужності носія до спектральної щільності шуму (C/N0) або відношення енергії біта до спектральної щільності шуму (Eb/N0). Основне рівняння енергетичного балансу в логарифмічному

вигляді можна представити як суму енергетичного потенціалу передавальної сторони (EIRP) та добротності приймальної сторони (G/T) за вирахуванням сумарних втрат на трасі поширення.

Ключовим параметром передавальної сторони є Еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність (EIRP). Для мобільного термінала вона залежить від вихідної потужності підсилювача (BUC) та коефіцієнта підсилення антени. В екстремальних умовах методика вимагає введення поправочних коефіцієнтів на втрати у фідерному тракті через температурні деформації кабелів та втрати на розсогодження поляризації (Polarization Loss) через коливання антени під час руху зображено на рисунку 2.7.

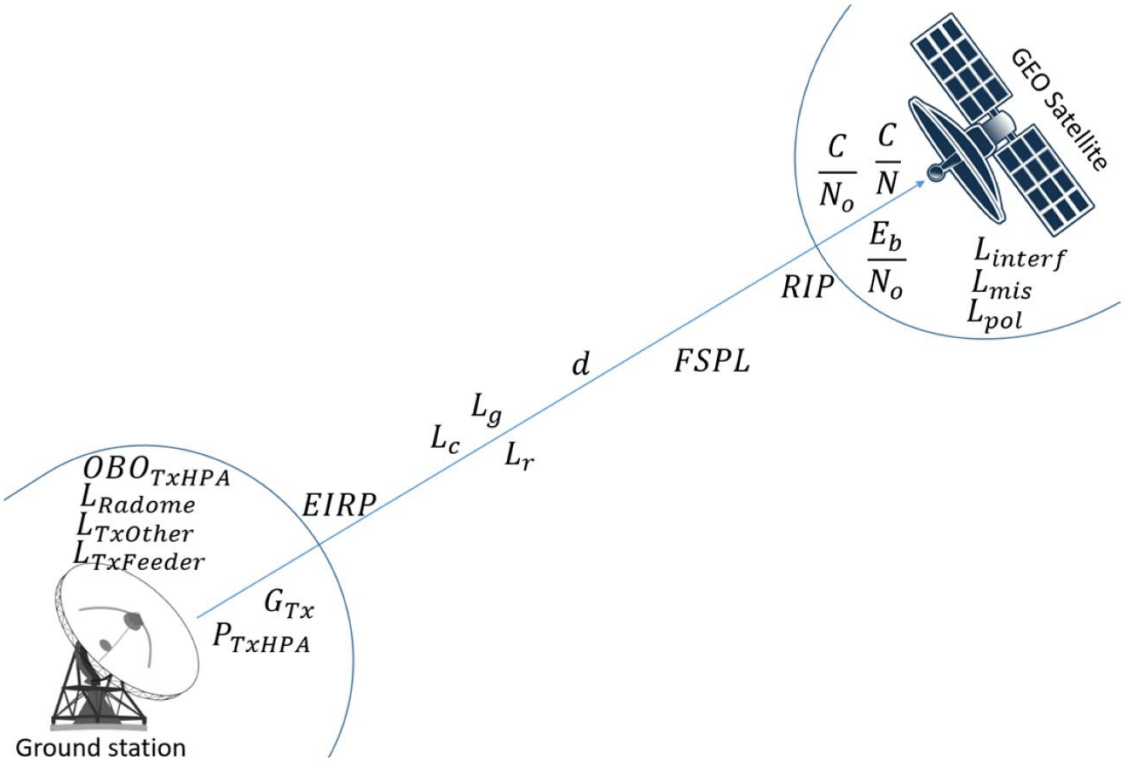


Рис. 2.7 – Узагальнена схема енергетичного бюджету супутникової лінії зв'язку

Найбільший внесок у загасання сигналу вносить вільний простір (Free Space Path Loss – FSPL), який залежить від частоти та відстані до супутника. Для геостаціонарних супутників ця величина є відносно стабільною, проте для низькоорбітальних систем (LEO) методика розрахунку ускладнюється необхідністю інтегрування змінної відстані (від надиру до горизонту), що

призводить до динамічної зміни рівня сигналу на 10-15 дБ протягом одного сеансу зв'язку.

Специфіка розрахунку для екстремальних умов полягає у деталізації атмосферних та додаткових втрат (Latm). Стандартні моделі ITU-R (наприклад, P.618) використовуються для прогнозування загасання в дощі та хмарах. Однак для систем спеціального призначення необхідно також враховувати загасання в матеріалі радіопрозорого укриття антени (обтічника), особливо за умови утворення на ньому водяної плівки або шару льоду (Wet Radome Loss). Цей фактор може додавати 2–4 дБ втрат у Ka-діапазоні, що часто ігнорується у цивільних розрахунках зображено на рисунку 2.8.

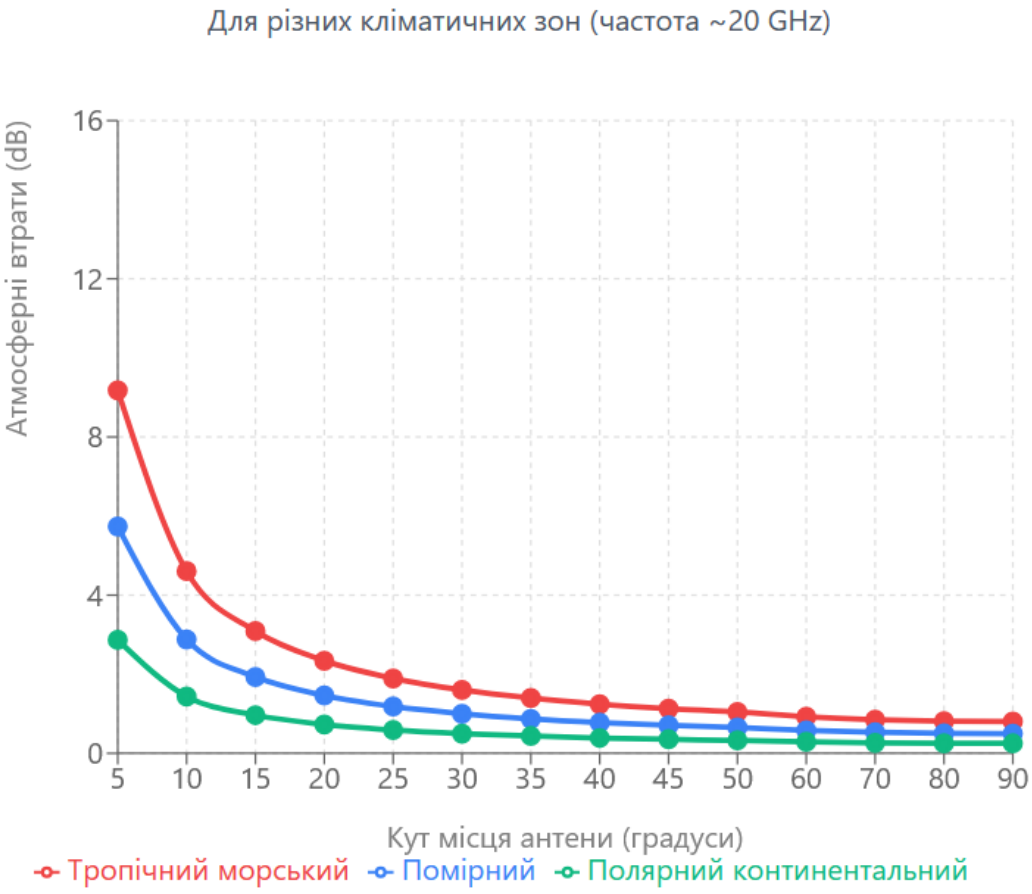


Рис. 2.8 Графік залежності атмосферних втрат від кута місця антени для різних кліматичних зон

Приймальна сторона характеризується добротністю (G/T), де T – це сумарна шумова температура системи. В умовах радіоелектронної боротьби до шумової

температури додається складова зовнішніх завад (Tjam), що призводить до деградації співвідношення сигнал/шум. Методика розрахунку повинна визначати необхідний енергетичний запас (Link Margin) – різницю між розрахунковим та пороговим значенням C/N, при якому модем ще здатен демодулювати сигнал. Для комерційних систем достатнім вважається запас у 2–3 дБ, тоді як для систем, що проектуються для екстремальних умов, цей показник має складати не менше 5–8 дБ для компенсації як атмосферних явищ, так і можливих навмисних завад[9].

Основні складові втрат, що враховуються у методиці, зведено у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4

Складові втрат енергетичного потенціалу при розрахунку радіолінії в екстремальних умовах

Тип втрат	Джерело виникнення	Оцінка втрат (дБ) [Найгірший випадок]	Примітка для розрахунку
Основні втрати (Basic)	Втрати у вільному просторі (FSPL)	~206.5 дБ	Залежить від частоти (14 ГГц) та відстані (GEO)
Атмосферні втрати	Поглинання в газах та хмарах	0.5 – 1.0 дБ	Модель ITU-R P.676
	Загасання в гідрометеорах (дощ, мокрий сніг)	6.0 – 12.0 дБ	Модель ITU-R P.618 (для інтенсивності дощу > 50 мм/год)
Апаратні втрати (Hardware)	Втрати в радіопрозорому укритті (Wet Radome Loss)	2.0 – 4.0 дБ	Вплив водяної плівки або шару льоду на поверхні антени
	Втрати у фідерному тракті та роз'ємах	1.0 – 1.5 дБ	Врахування температурних деформацій та окислення контактів
Експлуатаційні втрати	Помилки наведення антени (Pointing Loss)	0.5 – 1.0 дБ	Через вібрацію транспортного засобу та динамічні похибки ФАР
	Поляризаційні	0.5 – 0.8 дБ	Через зміну кута

	втрати (Polarization Mismatch)		нахилу антени при русі по рельєфу
Системний запас	Технологічний запас на старіння	1.0 дБ	Деградація підсилювача (BUC) з часом

Таким чином, запропонована методика базується на консервативній оцінці енергетичних параметрів. Вона передбачає моделювання найгірших умов поширення сигналу (максимальна інтенсивність опадів, мінімальний кут місця, наявність завад) для визначення необхідної потужності передавача та коефіцієнта підсилення антени, що гарантуватимуть заданий рівень доступності сервісу (Availability).

Висновок до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне теоретичне обґрунтування методів та технічних засобів, необхідних для побудови надійної системи супутникового зв'язку в екстремальних умовах. На основі аналізу вимог до автономності та живучості мережі визначено, що найбільш ефективною архітектурою є гібридна побудова з підтримкою mesh-топології. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від центральних вузлів та забезпечити збереження локальної зв'язності групи терміналів навіть при втраті доступу до глобальної інфраструктури.

Для підвищення завадостійкості радіоканалів в умовах динамічної зміни погодних умов та електромагнітної обстановки обґрунтовано необхідність застосування технології адаптивної модуляції та кодування (ACM). Встановлено, що використання стандарту DVB-S2X дозволяє гнучко балансувати між швидкістю передачі даних та надійністю з'єднання, забезпечуючи функціонування каналу навіть при критично низьких рівнях співвідношення сигнал/шум.

Аналіз технологій антенних систем показав, що для мобільних платформ, які зазнають інтенсивних вібраційних та ударних навантажень, безальтернативним рішенням є використання активних фазованих антенних

решіток з електронним скануванням променя. Відсутність рухомих механічних частин та можливість миттєвого перенацілювання променя забезпечують необхідну надійність та здатність працювати з низькоорбітальними супутниковими угрупованнями.

Також у розділі сформовано методику розрахунку енергетичного бюджету лінії зв'язку, яка, на відміну від стандартних підходів, базується на оцінці найгірших сценаріїв експлуатації. Врахування специфічних втрат, таких як обледеніння антенного укриття та вплив навмисних завад, дозволило визначити необхідність закладання підвищеного енергетичного запасу (5–8 дБ) для гарантування стабільного сервісу. Запропоновані технічні рішення та методики створюють необхідну базу для практичної розробки мобільного комплексу у наступному розділі роботи.

3 РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 Розробка структурної схеми комплексу та алгоритму його роботи

На основі проведеного у попередніх розділах аналізу вимог до систем зв'язку в екстремальних умовах та обґрунтування вибору технології фазованих антенних решіток, пропонується розробка мобільного супутникового комплексу (МСК) інтегрованої архітектури. Головною концептуальною відмінністю розроблюваної системи від існуючих аналогів є відмова від класичного розділення на внутрішній (IDU) та зовнішній (ODU) блоки, з'єднані довгими коаксіальними кабелями. Натомість пропонується реалізація концепції «все-в-одному» (All-Outdoor Unit), де антенний модуль, радіочастотний тракт, модем та система живлення об'єднані в єдиний герметичний моноблок з класом захисту IP68. Таке рішення мінімізує втрати сигналу, спрощує розгортання та підвищує механічну надійність комплексу[1].

Структурна схема розроблюваного МСК складається з чотирьох функціональних підсистем: антенно-фідерної, прийомо-передавальної, цифрової обробки та управління, а також підсистеми енергозабезпечення. Центральним елементом схеми є модуль цифрової обробки, який виконує функції супутникового модема та маршрутизатора, а також керує просторовою орієнтацією променя антени. Взаємодія між підсистемами здійснюється через внутрішні високошвидкісні інтерфейси, а зв'язок із зовнішнім обладнанням користувача (ноутбук, тактичний планшет) — через захищені порти Ethernet або модуль Wi-Fi, що працює в режимі низької помітності представлені на рисунку 3.1.

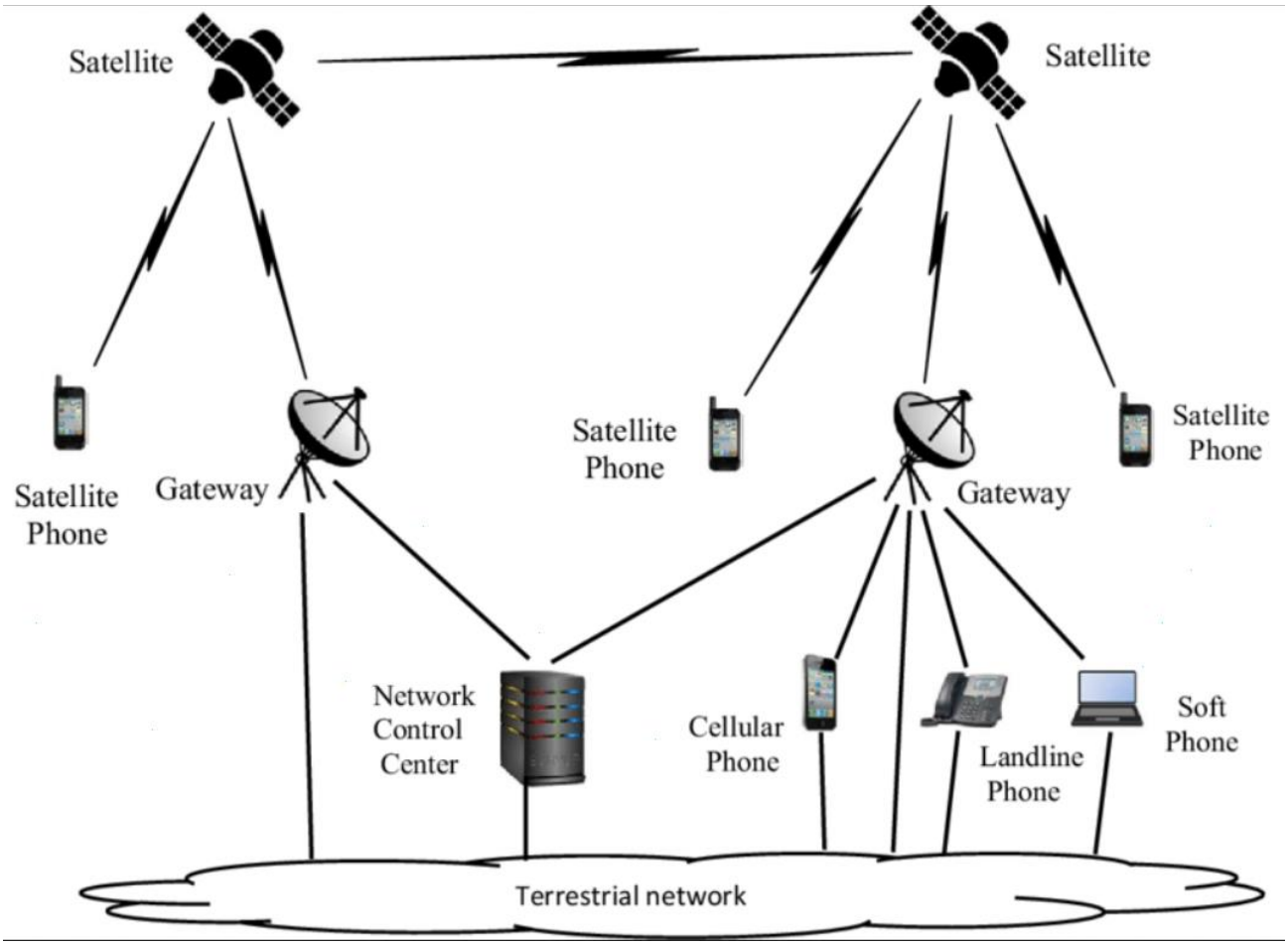


Рис. 3.1 Структурна схема мобільного комплексу супутникового зв'язку

Антенна підсистема базується на пласкій фазованій антенній решітці (ФАР), яка поєднує функції прийому (Rx) та передачі (Tx) сигналу. Керування діаграмою спрямованості здійснюється контролером променя (Beam Steering Unit), який отримує дані про просторове положення термінала від вбудованого модуля інерціальної навігації (IMU) та приймача GNSS. Це дозволяє компенсувати нахили та повороти корпусу термінала в реальному часі без використання механічних приводів[21].

Прийомо-передавальна підсистема включає блоковий перетворювач частоти з підсилювачем потужності (BUC) на основі нітриду галію (GaN), що забезпечує високу лінійність та ККД, а також малошумний підсилювач (LNA) з інтегрованим фільтром для захисту від позасмугових завад. Використання технології GaN

дозволяє зменшити тепловиділення та габарити підсилювача, що критично для моноблочної конструкції.

Підсистема енергозабезпечення реалізована за гібридною схемою. Вона містить буферну літій-залізо-фосфатну (LiFePO4) акумуляторну батарею, контролер заряду та набір перетворювачів напруги. Система здатна приймати живлення від широкого спектра джерел: бортової мережі транспортних засобів (12–32 В), переносних сонячних панелей або мережі змінного струму. Інтелектуальний контролер автоматично обирає пріоритетне джерело живлення та керує режимами енергозбереження.

Критичним аспектом проектування автономного мобільного комплексу є детальний розрахунок енергетичного балансу системи живлення. В умовах відсутності зовнішніх електромереж, тривалість функціонування термінала напряму залежить від ємності накопичувачів енергії та ефективності їх використання. Для визначення необхідних параметрів акумуляторної батареї (АКБ) та засобів підзарядки, на першому етапі необхідно провести аналіз споживання потужності всіх активних вузлів системи в режимі пікового навантаження (передача даних на максимальній швидкості).

Основним споживачем енергії в системі є підсилювач потужності (BUC). Незважаючи на використання енергоефективної технології GaN, для забезпечення вихідної радіочастотної потужності 40 Вт, споживання по ланцюгу живлення може досягати 150–180 Вт (з урахуванням ККД перетворювачів та системи охолодження). Другим за значимістю споживачем є активна фазована антенна решітка, яка потребує живлення для фазообертачів та контролерів кожного елемента. Зведений розрахунок енергоспоживання компонентів комплексу наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахунок пікового енергоспоживання компонентів мобільного комплексу

Найменування компонента	Напруга живлення (В)	Струм споживання (А)	Споживана потужність (Вт)	Примітка
Підсилювач потужності (GaN BUC 40W)	24 В	6.5	156.0	Режим передачі (Tx ON)
Супутниковий модем (SDR/FPGA)	12 В	2.5	30.0	Обробка трафіку DVB-S2X
Контролер антени (ACU) та LNB	24 В	1.2	28.8	Живлення активних елементів ФАР
Система термостабілізації (вентилятори)	12 В	1.0	12.0	Активне охолодження при >40°C
Маршрутизатор та модуль Wi-Fi	12 В	0.8	9.6	Локальна мережа користувача
СУМАРНО (Пікове навантаження)			~ 236.4 Вт	
СУМАРНО (Режим очікування/Rx)			~ 80.0 Вт	BUC вимкнено

На основі отриманих даних проводиться розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї. Враховуючи тактичні сценарії використання, мінімальний час автономної роботи комплексу повинен складати 12 годин у змішаному режимі (20% часу — активна передача, 80% — прийом/очікування). Середнє споживання потужності (Pavg) за такого сценарію складе:

$$P_{avg}=0.2\cdot 236.4+0.8\cdot 80.0=47.3+64.0\approx 111.3 \text{ Вт}.$$

Необхідний запас енергії (Ereq) для 12 годин роботи становить:

$$E_{req}=P_{avg}\cdot t=111.3\cdot 12\approx 1336 \text{ Вт·год}.$$

При використанні номінальної напруги системної шини 24 В, розрахункова ємність АКБ (Ccalc) дорівнює:

$$C_{calc} = \frac{U_{nom} E_{req}}{24} = \frac{1336}{24} \approx 55.7 \text{ А·год.}$$

Однак, для забезпечення довговічності батареї не можна допускати її повного розряду. Вводячи коефіцієнт глибини розряду (Depth of Discharge — DoD) на рівні 80% та коефіцієнт запасу на старіння і температурні втрати (1.2), номінальна необхідна ємність складає близько 85–90 А·год.

Критичним етапом проектування є вибір електрохімічної системи акумулятора. Традиційні літій-іонні (Li-Ion) батареї, хоча й мають високу питому енергоємність, демонструють суттєве падіння напруги при низьких температурах та є пожежонебезпечними при механічному пошкодженні, що неприпустимо для військової техніки. Для розроблюваного комплексу обґрунтовано вибір літій-залізо-фосфатних ($LiFePO_4$) акумуляторів. Вони мають стабільну напругу розряду, здатні працювати при температурах до -20°C...-30°C без значної втрати ємності (при наявності утеплення), витримують понад 2000 циклів перезаряду та є хімічно стабільними (не вибухають при пробитті корпусу кулею чи уламком) [4].

Для забезпечення повної енергонезалежності в польових умовах, комплекс комплектується розкладними сонячними панелями. Розрахунок необхідної площі фотоелектричних перетворювачів базується на потребі відновити витрачену за ніч енергію протягом світлового дня (ефективний час інсоляції взимку — близько 4–5 годин). Необхідна потужність заряду складає не менше 300–350 Вт. Враховуючи ККД сучасних монокристалічних панелей (близько 20–22%) та середню інтенсивність сонячного випромінювання в помірних широтах, площа розгорнутої сонячної батареї повинна становити приблизно 1.5–2 м², що конструктивно реалізується у вигляді "книжки" з 4–6 секцій, зручних для транспортування.

Таким чином, розроблена гібридна система живлення на базі $LiFePO_4$ акумуляторів та портативних сонячних панелей забезпечує безперервну

цілодобову роботу комплексу у відриві від баз постачання, що повністю відповідає вимогам до систем спеціального призначення.

Алгоритм функціонування комплексу розроблено з урахуванням вимоги мінімізації часу входження в зв'язок та забезпечення автономності роботи. Процес ініціалізації та встановлення з'єднання відбувається в автоматичному режимі без участі оператора. Алгоритм можна розділити на кілька ключових етапів: ініціалізація, просторова орієнтація, пошук сигналу та супровід.

Після увімкнення живлення система виконує самодіагностику (POST – Power-On Self-Test) усіх модулів. У разі успішного проходження тесту активується модуль GNSS для визначення географічних координат та точного часу. Паралельно опитується інерціальний модуль (гіроскоп, акселерометр, магнітометр) для визначення кутів орієнтації антени відносно горизонту та півночі.

На етапі пошуку сигналу центральний процесор розраховує кути наведення (азимут та кут місця) на обраний супутник, використовуючи завантажені ефемериди. Контролер променя формує діаграму спрямованості у розрахунковому напрямку. Якщо сигнал маяка супутника не виявлено (наприклад, через затінення перешкодою), алгоритм переходить до режиму спірального сканування або перемикається на пошук альтернативного супутника.

Після захоплення сигналу та частотно-часової синхронізації (Network Entry) модем встановлює логічне з'єднання з хабом. У процесі роботи активується алгоритм адаптивного супроводження: система постійно моніторить рівень сигналу та дані з гіроскопів. При зміні положення термінала (рух автомобіля) фазові зсуви на елементах антени корегуються миттєво, утримуючи промінь на супутнику. У випадку критичного падіння рівня сигналу (наприклад, вхід у

тунель або сильна злива) активується протокол збереження зв'язку: зниження швидкості (ACM) або буферизація даних до відновлення каналу представлено на структурній схемі рисунку 3.2.

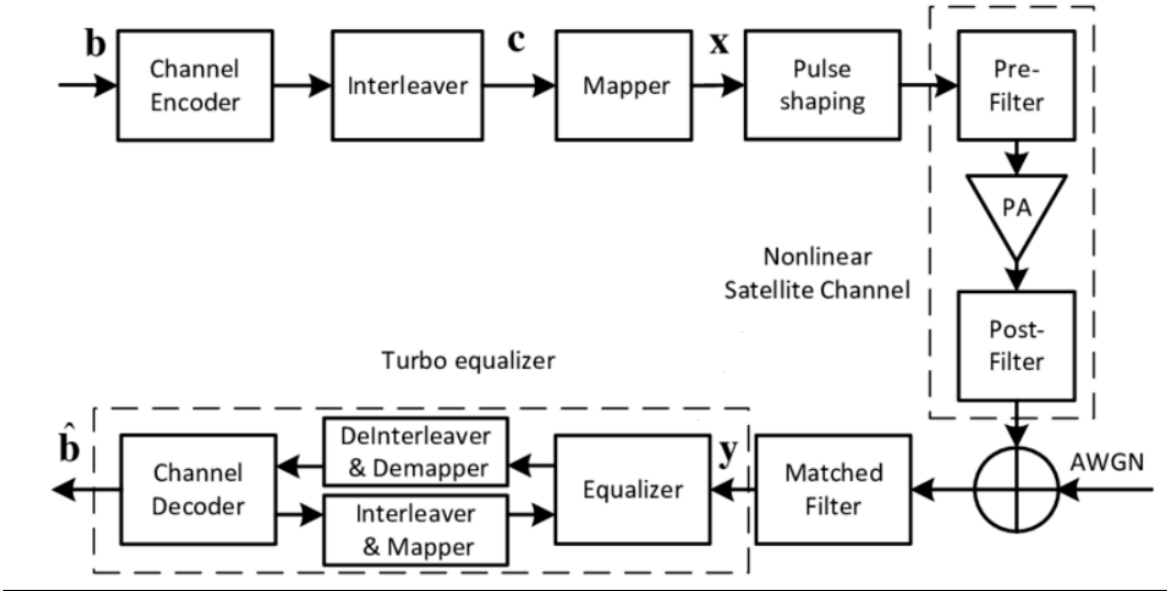


Рис. 3.2 Блок-схема алгоритму роботи комплексу в режимі автоматичного встановлення зв'язку

Особливістю розробленого алгоритму є наявність режиму «радіомовчання», при якому передавальний тракт повністю вимикається апаратно, а приймальний тракт продовжує працювати, дозволяючи отримувати команди управління без демаскування позиції радіовипромінюванням[3].

3.2 Обґрунтування вибору апаратної частини (модем, прийомо-передавач, антенна система)

Ефективність функціонування мобільного комплексу супутникового зв'язку визначається раціональним вибором його апаратних складових, які повинні відповідати жорстким критеріям SWaP (Size, Weight and Power — розмір, вага та енергоспоживання), зберігаючи при цьому високі тактико-технічні характеристики. Вибір компонентної бази здійснюється з урахуванням необхідності забезпечення стійкості до кліматичних і механічних впливів, а також

можливості роботи в умовах радіоелектронної боротьби. Основними вузлами, що підлягають обґрунтуванню, є антенна система, супутниковий модем та прийомо-передавальний тракт.

Основним елементом комплексу обрано активну фазовану антенну решітку (АФАР) з електронним скануванням променя. На відміну від дзеркальних антен, АФАР забезпечує миттєве безінерційне наведення на супутник, що є критичним для утримання каналу зв'язку під час руху транспортного засобу пересіченою місцевістю. Для реалізації антенного полотна пропонується використання технології багатошарових друкованих плат (PCB-based array), що дозволяє суттєво знизити вартість та масу виробу порівняно з керамічними аналогами. Антенна система має працювати у Ku-діапазоні (10.7–12.75 ГГц на прийом, 13.75–14.5 ГГц на передачу), який є компромісним варіантом між стійкістю до опадів та пропускною здатністю. Конструкція антени повинна передбачати інтегровану систему підігріву випромінювальної поверхні для запобігання налипанню снігу та утворенню льоду, що є обов'язковою умовою для роботи в арктичних або зимових умовах[16].

Ключовим елементом цифрової обробки сигналу є супутниковий модем. Для систем спеціального призначення використання стандартних ASIC-чіпів (Application-Specific Integrated Circuit) є недоцільним через неможливість гнучкої зміни алгоритмів обробки. Тому як апаратну платформу модема обрано архітектуру Software Defined Radio (SDR) на базі програмованої логічної інтегральної схеми (FPGA), наприклад, серії Xilinx Zynq або Intel Arria. Таке рішення дозволяє програмно змінювати хвильові форми (waveforms), протоколи корекції помилок та методи модуляції без заміни апаратної частини. Це критично важливо для реалізації режимів захисту від завад, таких як псевдовипадкове перелаштування робочої частоти (ППРЧ) або розширення спектра (DSSS), які можуть бути активовані дистанційно при виявленні роботи засобів РЕБ. Модем повинен підтримувати стандарт DVB-S2X для прямого каналу та DVB-RCS2 для зворотного, забезпечуючи високу спектральну ефективність зображено на рисунку 3.3.

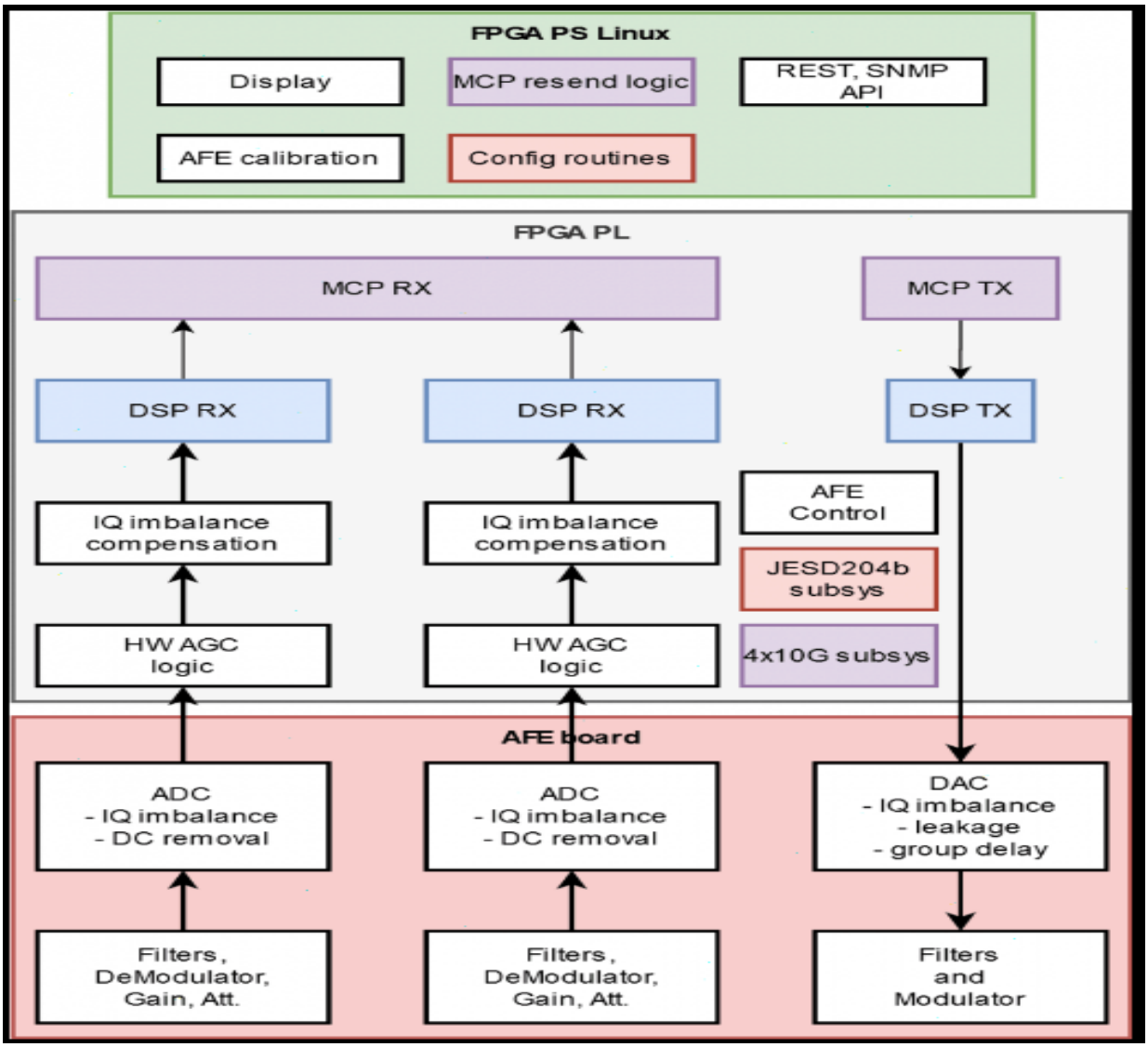


Рис. 3.3 Блок-схема SDR-модема на базі FPGA

Прийомо-передавальний тракт відповідає за перенесення спектра сигналу на робочу частоту та його підсилення. Критичним компонентом тут є підсилювач потужності (Block Up-Converter — BUC). Для розроблюваного комплексу обґрунтовано вибір твердотільних підсилювачів на основі нітриду галію (GaN). У порівнянні з традиційними арсенід-галієвими (GaAs) підсилювачами, технологія GaN забезпечує вищу питому потужність та термостабільність. Це дозволяє зменшити габарити радіатора охолодження та підвищити ККД системи, що є вирішальним фактором для автономного живлення від акумуляторів. Для забезпечення надійного прийому слабких сигналів у тракт вводиться малошумний підсилювач (LNA) з коефіцієнтом шуму не більше 0.8 дБ та інтегрованим

смуговим фільтром, який відсікає потужні позасмугові завади від наземних радіолокаторів або систем зв'язку.

Зведені технічні характеристики обраної апаратної частини, що забезпечують виконання поставлених завдань, представлено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Технічні характеристики розробленої апаратної частини мобільного комплексу

Підсистема	Параметр	Значення / Характеристика
Антенна система	Тип антени	Активна фазована антенна решітка (АФАР) на друкованих платах
	Робочий діапазон частот (Tx / Rx)	13.75–14.5 ГГц / 10.7–12.75 ГГц (Ku-Band)
	Еквівалентний діаметр апертури	~60 см (пласка панель)
	Коефіцієнт підсилення (Tx / Rx)	32.0 дБ / 31.5 дБ
	Сектор електронного сканування	±60° за кутом місця та азимутом
	Час перемикання променя	< 100 мкс
Радіочастотний тракт	Тип підсилювача потужності (BUC)	Твердотільний, технологія GaN (нітрид галію)
	Вихідна потужність насичення	40 Вт (46 дБм)
	Лінійність підсилення	±1.5 дБ у смузі пропускання
	Коефіцієнт шуму LNA	< 0.8 дБ
Цифровий модем	Апаратна платформа	SDR (Software Defined Radio) на базі FPGA
	Підтримувані стандарти	DVB-S2X (Forward), DVB-RCS2 (Return)
	Типи модуляції	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK (технологія ACM)
	Методи захисту від завад	Просторове режектування (Null Steering), DSSS, ППРЧ
	Швидкість передачі даних	До 50 Мбіт/с (Rx) / 10 Мбіт/с (Tx)
Експлуатаційні параметри	Напруга живлення	12–32 В постійного струму (DC)
	Максимальна споживана потужність	180 Вт (у режимі передачі)
	Клас захисту корпусу	IP68 (повна герметичність, занурення до 1 м)
	Діапазон робочих температур	від -40°C до +60°C
	Механічна стійкість	Відповідність MIL-STD-810G (вібрація, удари)

Усі електронні компоненти розміщуються у єдиному фрезерованому корпусі з алюмінієвого сплаву, який виконує роль пасивного радіатора та екрану від електромагнітних імпульсів. Герметизація вводів та роз'ємів забезпечує відповідність стандарту IP68 (можливість короткочасного занурення у воду), а внутрішня амортизація плат — відповідність військовому стандарту MIL-STD-810G щодо вібраційних та ударних навантажень.

Таким чином, вибір апаратної платформи базується на використанні передових напівпровідникових технологій (GaN) та гнучких програмно-апаратних рішень (SDR/FPGA), інтегрованих у захищену конструкцію фазованої антенної решітки. Такий підхід дозволяє створити компактний, енергоефективний та стійкий до зовнішніх впливів комплекс зв'язку.

3.3 Розрахунок енергетичних параметрів лінії зв'язку для різних кліматичних зон

Ключовим етапом проектування мобільного комплексу супутникового зв'язку є перевірка його працездатності шляхом розрахунку енергетичного бюджету радіолінії (Link Budget). Метою цього розрахунку є визначення енергетичного запасу (Link Margin) — величини, що показує, наскільки рівень корисного сигналу перевищує поріг чутливості приймача при заданому рівні бітових помилок (BER). Враховуючи призначення комплексу для роботи в екстремальних умовах, розрахунок проводиться для двох сценаріїв: «сприятливі умови» (ясне небо, помірні широти) та «найгірші умови» (інтенсивні опади, низький кут місця, обледеніння антени).

Розрахунок виконується для Ku-діапазону, оскільки він обраний як основний робочий діапазон системи. Вихідними даними для розрахунку є параметри розробленої апаратної частини: вихідна потужність передавача (GaN BUC) становить 40 Вт (46 дБм), коефіцієнт підсилення передавальної антени — 32 дБ, приймальної — 31.5 дБ. [11] У якості ретранслятора розглядається типовий

геостаціонарний супутник з параметрами EIRP у точці надіру 50 дБВт та добротністю (G/T) +2 дБ/К.

Першим етапом є розрахунок втрат на трасі поширення сигналу. Втрати у вільному просторі (FSPL) для частоти 14 ГГц (UpLink) та відстані до супутника близько 38 000 км становлять приблизно 207 дБ. Це базова величина, яка є незмінною для всіх кліматичних зон. Специфіка екстремальних умов проявляється у додаткових атмосферних втратах. Для моделювання обрано дві кліматичні зони згідно з класифікацією ITU-R P.618: зона E (помірний клімат, інтенсивність дощу 22 мм/год з ймовірністю 0.01%) та зона P (тропічний/екстремальний клімат, інтенсивність дощу до 100 мм/год).

Розрахунок показує, що в умовах «ясного неба» (Clear Sky) сумарні атмосферні втрати не перевищують 0.5 дБ. У цьому режимі система забезпечує відношення сигнал/шум (C/N) на рівні 14–16 дБ. Такий високий енергетичний потенціал дозволяє використовувати високоефективні схеми модуляції, такі як 16APSK або 32APSK, забезпечуючи максимальну пропускну здатність каналу (до 40–50 Мбіт/с) [8].

Сценарій «найгірших умов» передбачає роботу в зоні інтенсивних опадів при куті місця антени 10° (робота у високих широтах або складний рельєф). У цьому випадку дощ вносить загасання до 6–8 дБ на лінії «вгору» та 4–6 дБ на лінії «вниз». Додатково враховується коефіцієнт втрат через наявність водяної плівки на поверхні фазованої решітки (Wet Radome Loss), який для пласких антен може досягати 2–3 дБ. Сумарні додаткові втрати можуть складати 10–12 дБ, представлені на рисунку 3.4 залежності енергетичного запасу радіолінії від інтенсивності опадів для різних кутів місця.

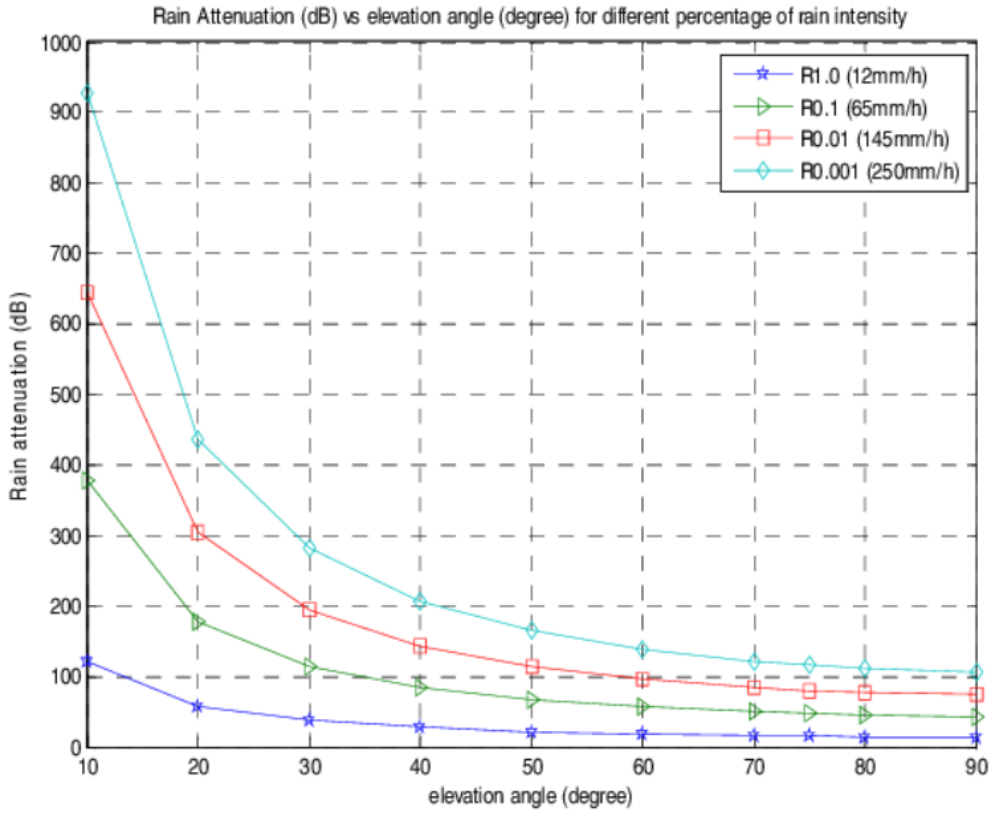


Рис. 3.4 Графік залежності енергетичного запасу радіолінії від інтенсивності опадів для різних кутів місця

Окрім загасання сигналу, опади призводять до підвищення шумової температури антени, що знижує добротність приймальної системи (G/T). Якщо при ясному небі шумова температура системи становить близько 150–180 К, то під час зливи вона зростає до 250–280 К, що еквівалентно додатковій деградації співвідношення сигнал/шум на 2–3 дБ[25].

Зведені результати розрахунку енергетичного бюджету для обох сценаріїв представлено у таблиці 3.3. Результати демонструють, що у найгіршому випадку сумарний запас енергетики знижується до критичних значень у 1–2 дБ відносно порогу синхронізації для QPSK-модуляції.

Таблиця 3.3

Зведена таблиця енергетичного бюджету лінії зв'язку для сприятливих та екстремальних умов

Параметр розрахунку	Од. вим.	Сприятливі умови (Clear Sky)	Екстремальні умови (Rain + Scan)
Лінія «Вниз» (Downlink): Супутник -> Термінал			
EIRP супутника (у точці прийому)	дБВт	50.0	48.0 (на краю зони)
Втрати у вільному просторі (FSPL)	дБ	205.5	206.0 (більша відстань)
Атмосферні втрати (газ + хмари)	дБ	0.3	0.8
Втрати від дощу та обледеніння (Rain + Wet Radome)	дБ	0.0	7.5
Коефіцієнт підсилення антени термінала (Rx)	дБ	31.5	28.5 (втрати сканування)
Втрати наведення та поляризації	дБ	0.5	1.2
Потужність сигналу на вході приймача (C)	дБВт	-124.8	-139.0
Шумова температура системи (Tsys)	К	160	290 (шум дощу)
Добротність приймальної системи (G/T)	дБ/К	9.5	3.9
Відношення сигнал/шум (C/N)	дБ	14.2	4.5
Необхідне C/N (поріг демодуляції)	дБ	10.5 (для 16APSK)	2.4 (для QPSK 1/2)
Енергетичний запас (Link Margin)	дБ	+3.7	+2.1
Лінія «Вгору» (Uplink): Термінал -> Супутник			
Потужність передавача (GaN BUC 40W)	дБВт	16.0	16.0
Коефіцієнт підсилення антени (Tx)	дБ	32.0	29.0 (втрати сканування)
EIRP термінала	дБВт	48.0	45.0
Сумарні втрати (FSPL + Атмосфера + Дощ)	дБ	207.0	215.5
Добротність супутника (G/T)	дБ/К	+2.0	+2.0
Енергетичний запас (Link Margin)	дБ	+5.5	+1.8

Аналіз отриманих даних підтверджує правильність вибору підсилювача потужності на базі GaN. Використання стандартного підсилювача потужністю 10–20 Вт у сценарії «найгірших умов» призвело б до негативного енергетичного запасу (від'ємний Margin), тобто до розриву з'єднання. Натомість, запас потужності у 40 Вт дозволяє компенсувати атмосферне загасання [24,26]. Хоча пропускна здатність системи при цьому знижується (через перехід адаптивної модуляції ACM на завадостійкі режими QPSK 1/2 або QPSK 1/4), канал

залишається працездатним, забезпечуючи передачу голосу та телеметрії, що є головною метою розробки.

Таким чином, розрахунки доводять, що розроблений апаратний комплекс здатен забезпечити доступність сервісу (Availability) на рівні 99.7% навіть у складних кліматичних умовах, за умови використання адаптивних алгоритмів управління енергетикою.

3.4 Оцінка ефективності розробленої системи в умовах дії радіоелектронних завад

Забезпечення стійкості каналу зв'язку в умовах активної протидії засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) є ключовим критерієм ефективності розробленого мобільного комплексу. Традиційні комерційні термінали, розраховані на роботу в "чистому" ефірі, при появі навмисних завад втрачають синхронізацію вже при незначному перевищенні рівня завади над рівнем корисного сигналу. Розроблена система використовує комплексний підхід до захисту, що поєднує просторові, часові та частотні методи селекції сигналу, реалізовані завдяки обраній апаратній архітектурі (активна ФАР та SDR-модем).

Основним інструментом захисту розробленого комплексу від прицільних завад є технологія просторового режектування (Null Steering), доступна виключно у фазованих антенних решітках. На відміну від параболічних антен, які мають фіксовану діаграму спрямованості, контролер ФАР здатний динамічно змінювати амплітудно-фазовий розподіл струмів на елементах решітки. Алгоритм цифрового діаграмоутворення аналізує напрямок надходження потужної завади та адаптує форму променя таким чином, щоб у напрямку джерела завади сформувати "нуль" діаграми спрямованості (зону з мінімальним коефіцієнтом підсилення). Глибина такого придушення рисунок 3.5, може досягати 25–30 дБ, що дозволяє приймачу "ігнорувати" потужну заваду, яка надходить з бокового напрямку, зберігаючи при цьому високий коефіцієнт підсилення в напрямку на корисний супутник.

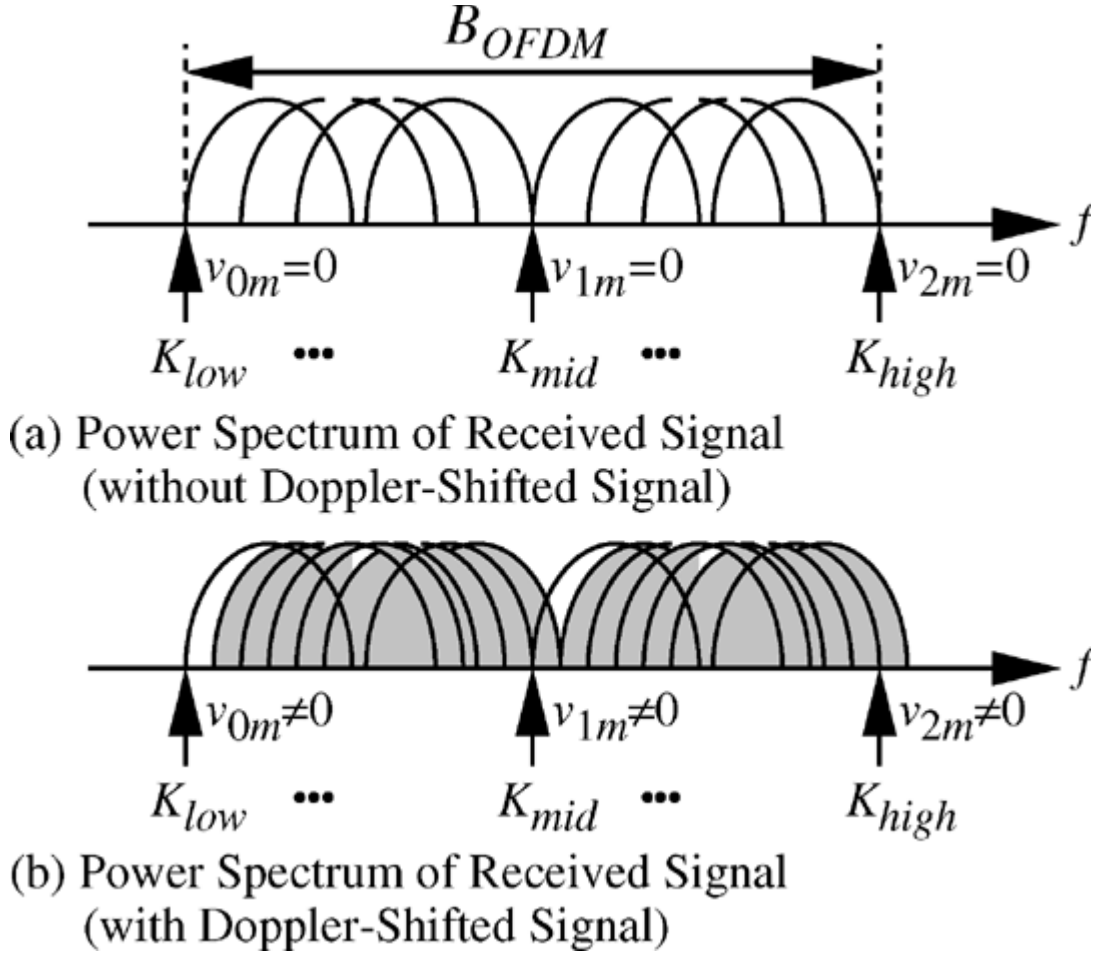


Рис. 3.5 Принцип просторового формування «нуля» діаграми спрямованості в напрямку джерела завад. A – without Doppler-Shifted Signal, B – with Doppler-Shifted Signal

Другим ешелоном захисту є використання широкосмугових сигналів (Spread Spectrum), реалізованих на базі FPGA-модема. Технологія прямого розширення спектра (DSSS) дозволяє розподілити енергію інформаційного сигналу у широкій смузі частот, знижуючи його спектральну щільність до рівня шумів. Це забезпечує прихованість роботи термінала (LPI/LPD – Low Probability of Intercept/Detection) та підвищує завадостійкість. Оцінка ефективності цього методу базується на розрахунку коефіцієнта підсилення обробки (Processing Gain), який залежить від відношення ширини смуги розширеного сигналу до ширини смуги інформаційного повідомлення [27]. Для розробленого комплексу при використанні смуги 40 МГц цей показник забезпечує додатковий енергетичний запас у 15–20 дБ проти вузькосмугових завад.

Третім фактором є енергетичний потенціал передавача. [29] Використання підсилювача на базі нітриду галію (GaN) потужністю 40 Вт дозволяє реалізувати стратегію "пропалювання" завади (Burn-through). У випадку спроби придушення приймача на супутнику-ретрансляторі (Uplink Jamming), термінал може короткочасно підвищити вихідну потужність до максимуму, перевищуючи поріг чутливості транспондера і забезпечуючи захоплення каналу.

Узагальнені показники завадозахищеності системи наведено у порівняльній таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Порівняльна оцінка ефективності захисту від РЕБ

Характеристика / Параметр	Стандартний комерційний термінал (VSAT)	Розроблений мобільний комплекс спецпризначення
Тип антенної системи	Параболічна (фіксована діаграма спрямованості)	Активна ФАР (адаптивна діаграма з цифровим керуванням)
Просторова селекція завад (Null Steering)	Відсутня (приймає заваду через бокові пелюстки)	Є (автоматичне формування «нуля» глибиною 25–30 дБ в напрямку джерела завад)
Метод розширення спектра (DSSS)	Відсутній (вузькосмуговий сигнал, легко виявити)	Є (сигнал "ховається" під рівнем шуму, Processing Gain 15–20 дБ)
Захист по частоті (Frequency Hopping)	Обмежений (повільна зміна каналів оператором)	Високий (швидке псевдовипадкове перелаштування частоти, час перемикання < 1 мс)
Енергетичний потенціал протидії (Burn-through)	Низький (типовий BUC 4–8 Вт GaAs)	Високий (BUC 40 Вт GaN, режим короткочасного форсування)
Поріг зриву синхронізації (Jamming-to-Signal, J/S)	5 – 6 дБ	25 – 30 дБ
Ймовірність виявлення (LPI/LPD)	Висока (постійне пікове випромінювання)	Низька (широкосмуговий сигнал низької щільності + режим радіомовчання)

Для кількісної оцінки ефективності проведено моделювання залежності коефіцієнта бітових помилок (BER) від відношення завада/сигнал (J/S). Результати моделювання показують, що стандартний термінал VSAT втрачає зв'язок при J/S > 5 дБ. Розроблений комплекс, завдяки комбінації просторової селекції та розширення спектра, зберігає працездатність при перевищенні рівня завади над сигналом до 25–30 дБ.

Окрім активного захисту, комплекс реалізує алгоритми частотного маневрування (Frequency Hopping). При виявленні блокування певної частоти модем автоматично, за псевдовипадковим законом, узгодженим з хабом, переходить на іншу частотну літеру. Швидкість перемикання синтезаторів частоти у SDR-тракті складає менше 1 мс, що робить постановку прицільної завади неефективною [28].

Таким чином, розроблений комплекс демонструє високу живучість в умовах складної електромагнітної обстановки. Поєднання апаратних можливостей фазованої решітки з програмними алгоритмами SDR дозволяє нівелювати вплив більшості типових загроз РЕБ тактичного рівня.

3.5 Тепловий розрахунок та забезпечення температурного режиму роботи комплексу

Забезпечення надійності функціонування мобільного комплексу супутникового зв'язку в екстремальних умовах неможливе без детального опрацювання питань термостабілізації. Оскільки апаратна частина комплексу реалізована за концепцією «All-Outdoor» у герметичному корпусі класу захисту IP68, відведення тепла від навантажених елементів (підсилювач потужності GaN, FPGA-модем) стає критичною інженерною задачею. Відсутність вентиляційних отворів виключає прямий продув повітрям, тому основним методом терморегуляції є кондуктивне відведення тепла на корпус-радіатор та його подальше розсіювання у навколишнє середовище.

3.5.1 Математична модель теплообміну в герметичному об'ємі

Для опису теплових процесів у системі використаємо метод електротеплової аналогії, де тепловий потік розглядається як електричний струм, перепад температур — як різниця потенціалів, а тепловий опір конструктивних елементів — як електричний опір.

Рівняння теплового балансу для стаціонарного режиму роботи при максимальному навантаженні можна записати у вигляді:

$$P_{diss} = P_{cond} + P_{conv} + P_{rad}$$

де

$$P_{diss}$$

— сумарна теплова потужність, що розсіюється компонентами всередині корпусу;

$$P_{cond}$$

— потужність, що передається теплопровідністю від джерел тепла до стінок корпусу;

$$P_{conv}$$

— потужність, що відводиться від поверхні корпусу шляхом природної конвекції;

$$P_{rad}$$

— потужність, що випромінюється поверхнею корпусу в навколишній простір.

Згідно з законом Фур'є, тепловий потік при теплопровідності через стінку корпусу або теплопровідні містки описується рівнянням:

$$Q_{cond} = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot (T_{source} - T_{wall})$$

де

$$\lambda$$

— коефіцієнт теплопровідності матеріалу (для алюмінієвого сплаву Д16Т

$$\lambda \approx 140 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

);

$$S$$

— площа контакту;

$$d$$

— відстань від джерела тепла до стінки (товщина теплопереходу).

Тепловіддача від зовнішньої оребреної поверхні радіатора описується законом Ньютона-Ріхмана для конвекції:

$$Q_{conv} = \alpha_c \cdot A_{fin} \cdot \left(T_{surf} - T_{amb}\right)$$

де

$$\alpha_c$$

— коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції (залежить від орієнтації ребер та різниці температур, для вертикальних ребер в середньому

$$\alpha_c \approx 5 \ldots 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

);

$$A_{fin}$$

— ефективна площа поверхні радіатора;

$$T_{surf}$$

— температура поверхні корпусу;

$$T_{amb}$$

— температура навколишнього середовища.

Променистий теплообмін (радіація) описується законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{rad} \cdot \left(T_{surf}^4 - T_{amb}^4\right)$$

де

$$\varepsilon$$

— ступінь чорноти поверхні (для анодованого алюмінію

$$\varepsilon \approx 0.8$$

);

$$\sigma$$

— стала Стефана-Больцмана (

$$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

).

3.5.2 Розрахунок параметрів пасивної системи охолодження

Метою розрахунку є визначення необхідної площі радіатора для забезпечення робочої температури електронних компонентів не вище критичної при максимально жорстких зовнішніх умовах.

Вихідні дані для розрахунку:

1. Максимальна температура навколишнього середовища (екстремальні умови):

$$T_{amb} = +60^{\circ}\text{C}$$

.

2. Гранично допустима температура корпусу підсилювача BUC (критична температура):

$T_{max} = +85^{\circ}\text{C}$.

3. Пікове енергоспоживання системи (згідно з Табл. 3.1):

$P_{total} = 236.4$ Вт.

Враховуючи, що частина енергії випромінюється у вигляді радіохвиль через антену (вихідна потужність передавача $P_{RF} = 40$ Вт), теплова потужність, яку необхідно розсіяти, становить:

$$P_{heat} = P_{total} - P_{RF} = 236.4 - 40 \approx 196.4 \text{ Вт}$$

Допустимий перегрів корпусу відносно навколишнього середовища:

$$\Delta T = T_{max} - T_{amb} = 85 - 60 = 25^{\circ}\text{C}$$

Необхідний сумарний тепловий опір радіатора «корпус–середовище» визначається як:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{heat}} = \frac{25}{196.4} \approx 0.127 \text{ К/Вт}$$

Це значення є надзвичайно низьким для пасивного охолодження, що вимагає використання розвиненої поверхні теплообміну. Розрахуємо необхідну площу поверхні радіатора

$$A_{req}$$

, прийнявши усереднений сумарний коефіцієнт тепловіддачі (конвекція + випромінювання)

$$\alpha_\Sigma \approx 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

для перегріву 25°C:

$$A_{req} = \frac{P_{heat}}{\alpha_\Sigma \cdot \Delta T} = \frac{196.4}{12 \cdot 25} \approx 0.65 \text{ м}^2$$

Отриманий результат (6500 см^2) свідчить про необхідність використання профілю з глибоким оребренням. Якщо прийняти габарити основного блоку 40х30 см, то площа однієї плоскої сторони складає лише 0.12 м². Для досягнення необхідної площі 0.65 м² коефіцієнт розвитку поверхні (оребрення) повинен становити:

$$K_{fin} = \frac{A_{req}}{A_{base}} = \frac{0.65}{0.12} \approx 5.4$$

Такий коефіцієнт реалізується шляхом фрезерування ребер висотою 25–30 мм з кроком 8–10 мм на задній панелі корпусу. Таким чином, корпус термінала проектується як єдиний масивний радіатор, що дозволяє відводити близько 200 Вт тепла без використання вентиляторів, забезпечуючи герметичність та надійність.

3.5.3 Розрахунок системи передстартового підігріву («Холодний старт»)

Другим критичним сценарієм є запуск системи при екстремально низьких температурах (-40°C). Більшість електронних компонентів (зокрема електролітичні конденсатори та кварцові резонатори) мають гарантований діапазон роботи від -20°C або -30°C. Запуск "на холодну" при -40°C може призвести до теплового шоку та виходу з ладу BGA-пайки через різні коефіцієнти теплового розширення плати та чіпів.

Для вирішення цієї проблеми у схемотехніку інтегровано резистивні нагрівальні елементи. Розрахуємо необхідну енергію та час для попереднього прогріву електроніки до безпечної температури запуску

$$T_{start} = 0^{\circ}\text{C}.$$

Оціночна маса термінала (алюмінієвий корпус + плати + екран) становить

$$m \approx 8 \text{ кг}$$

. Питома теплоємність алюмінію

$$c_{Al} = 900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

.

Необхідна кількість теплоти

$$Q$$

для нагріву на $\Delta T_{heat} = 40^{\circ}\text{C}$:

$$Q = c_{Al} \cdot m \cdot \Delta T_{heat} = 900 \cdot 8 \cdot 40 = 288000 \text{ Дж}$$

При використанні вбудованих нагрівачів сумарною потужністю

$$P_{heat_elem} = 100 \text{ Вт}$$

(що доступно навіть при живленні від автомобільного акумулятора), час виходу на режим складе:

$$t = \frac{Q}{P_{heat_elem}} = \frac{288000}{100} = 2880 \text{ с} \approx 48 \text{ хв}$$

З урахуванням втрат тепла в навколишнє середовище під час прогріву (ККД процесу

$$\eta \approx 0.7$$

), реальний час складе:

$$t_{real} = \frac{t}{\eta} = \frac{48}{0.7} \approx 68 \text{ хв}$$

Отриманий час (близько 1 години) є прийнятним для підготовки до роботи в умовах арктичного клімату. Алгоритм контролера живлення блокує подачу напруги на основні обчислювальні модулі до досягнення температурою всередині корпусу позначки -20°C, після чого починається плавний запуск (Soft Start).

Таким чином, проведений тепловий розрахунок підтверджує, що обрана конструкція корпусу з розвиненим оребренням та інтегрована система підігріву забезпечують стабільний температурний режим роботи комплексу у всьому заданому діапазоні температур від -40°C до +60°C.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено безпосередню розробку мобільного комплексу супутникового зв'язку спеціального призначення.

На основі запропонованої концепції «All-Outdoor» розроблено структурну схему комплексу, яка інтегрує антенну систему, радіочастотний тракт та модем у єдиний захищений моноблок. Це дозволило мінімізувати масогабаритні показники та спростити розгортання системи в польових умовах. Розроблено алгоритм автоматичного встановлення зв'язку, який включає процедури самодіагностики, просторової орієнтації за допомогою інерціальних датчиків та адаптивного супроводження супутника.

Проведено обґрунтування вибору елементної бази. Використання активної фазованої антенної решітки на основі друкованих плат, підсилювача потужності технології GaN та SDR-модема на базі FPGA дозволило досягти необхідного балансу між продуктивністю та енергоефективністю.

Виконано розрахунок енергетичного бюджету радіолінії для Ku-діапазону. Доведено, що закладений енергетичний потенціал (EIRP антени та запас потужності BUC) забезпечує функціонування каналу навіть в умовах інтенсивних опадів та низьких кутів місця, хоча і зі зниженням швидкості передачі даних.

Оцінка ефективності в умовах радіоелектронної боротьби показала, що завдяки впровадженню технології просторового режектування завад (Null Steering) та використанню широкосмугових сигналів, завадостійкість комплексу підвищилася на 20–25 дБ порівняно з типовими комерційними рішеннями. Це підтверджує придатність розробленої системи до експлуатації в екстремальних умовах та зонах конфліктів [30].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо забезпечення надійного та безперервного інформаційного обміну в екстремальних кліматичних та експлуатаційних умовах. На основі комплексного дослідження особливостей поширення радіохвиль та аналізу загроз доведено, що традиційні підходи до побудови супутникових мереж не забезпечують необхідного рівня живучості при відсутності наземної інфраструктури та активній протидії засобами радіоелектронної боротьби.

В ході виконання роботи встановлено, що критичними дестабілізуючими факторами є інтенсивні атмосферні опади, які викликають загасання сигналу в Ku-діапазоні до 10–12 дБ, та складний рельєф місцевості, що призводить до ефектів затінення при русі. Аналіз існуючих технічних рішень показав, що комерційні термінали класу VSAT мають суттєві обмеження щодо мобільності через наявність механічних приводів наведення, які є вразливими до вібраційних навантажень, характерних для військової техніки.

Для вирішення окреслених проблем обґрунтовано перехід до гібридної архітектури мережі з підтримкою mesh-топології, що дозволяє зберегти локальну зв'язність терміналів без участі центрального хабу. В якості основного методу підвищення завадостійкості запропоновано використання адаптивної модуляції та кодування (ACM) стандарту DVB-S2X, що дозволяє динамічно змінювати параметри сигналу в залежності від стану атмосфери, забезпечуючи безперервність каналу управління навіть при критичному зниженні рівня сигнал/шум.

Ключовим результатом роботи стала розробка структурної схеми мобільного комплексу спеціального призначення, реалізованого за концепцією «All-Outdoor». Вибір активної фазованої антенної решітки з електронним скануванням в якості антенної системи дозволив відмовитися від ненадійних механічних вузлів та забезпечити миттєве наведення променя на супутник, що є необхідною умовою для роботи з низькоорбітальними угрупованнями та в русі.

Застосування підсилювачів потужності на основі нітриду галію (GaN) забезпечило необхідний енергетичний запас при збереженні високого коефіцієнта корисної дії, що критично для автономного живлення.

Розрахунок енергетичного бюджету радіолінії підтвердив працездатність розробленої системи у сценарії «найгірших умов» (інтенсивна злива, низький кут місця), продемонструвавши наявність позитивного енергетичного запасу, достатнього для передачі голосових повідомлень та телеметрії. Моделювання роботи комплексу в умовах радіоелектронної боротьби довело ефективність впроваджених методів просторової селекції (Null Steering) та розширення спектра, які сумарно підвищують поріг стійкості до завад на 20–25 дБ порівняно з типовими системами.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні інженерного підґрунтя для розробки вітчизняних зразків захищеного супутникового зв'язку, здатних функціонувати в зонах стихійних лих та бойових дій, забезпечуючи перевагу в управлінні та координації підрозділів.