

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації  
Національного технічного університету України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

**Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В.**

# **СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ**

*Навчальний посібник*

*Рекомендовано Вченою радою Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” для використання в освітньому процесі в якості навчального посібника для курсантів (слухачів, студентів), які навчаються в Інституті за спеціальністю 172 “Телекомунікації та радіотехніка”*

Київ–2022

УДК 621.396  
ББК 32.973я7

Рецензенти: д.т.н., доцент Кононов Олексій Анатолійович, заступник начальника Державного науково-дослідного інституту авіації;  
к.т.н., с.н.с. Самборський Іван Іванович, доцент спеціальної кафедри № 3 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

*Рекомендовано Вченою радою  
ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 12 від 30.06.2022)*

**Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В.**

Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.

Навчальний посібник містить загальні відомості про супутниковий зв'язок, методи маніпуляції і завадостійкого кодування в стандарті другого покоління супутникового цифрового телебачення DVB-S2. Розкриває призначення, склад, технічні характеристики, принципи побудови та експлуатації таких супутникових систем зв'язку, як Tooway, Starlink, Thuraya, Inmarsat та Iridium.

Навчальний посібник призначений для проведення навчальних занять з курсантами (слухачами, студентами), які навчаються в ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського за спеціальністю 172 “Телекомунікації та радіотехніка”

## ЗМІСТ

---

|  | стор.     |
|--|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>ВСТУП.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....</b>  | <b>10</b> |
| 1.1 Загальні відомості.....  | 10        |
| 1.2 Супутникові орбіти.....  | 15        |
| 1.3 Діапазон робочих частот супутника ретрансляції даних.....  | 22        |
| 1.4 Відновлення супутникового сигналу.....   | 34        |
| 1.5 Передавальна мережа супутникового зв'язку.....   | 35        |
| 1.6 Прикладні програми супутникового зв'язку.....  | 42        |
| Питання для самоконтролю до розділу 1.....   | 46        |
| <b>РОЗДІЛ 2 СТАНДАРТ СУПУТНИКОВОГО ЦИФРОВОГО<br/>ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-S2.....</b>                                     | <b>47</b> |
| 2.1 Загальна характеристика стандарту DVB-S2.....  | 47        |
| 2.2 Особливості перетворення цифрових потоків в<br>передавальних і приймальних системах стандарту<br>DVB-S2..... | 48        |
| 2.3 Методи маніпуляції і завадостійкого кодування в стандарті<br>DVB-S2.....                                     | 49        |
| 2.4 Розподілення поляризаційно-частотних ресурсів<br>супутникових ретрансляторів.....                            | 55        |
| 2.5 Квадратурно-фазова маніпуляція (QPSK).....   | 56        |
| Питання для самоконтролю до розділу 2.....   | 67        |
| <b>РОЗДІЛ 3 СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ.....</b>   | <b>68</b> |
| 3.1 Загальні відомості про спеціальну підсистему резервного<br>зв'язку Ka-Sat VSAT eTria.....                    | 68        |
| 3.2 Тактико-технічні характеристики супутникового зв'язку<br>Тоoway.....   | 71        |
| 3.3 Склад обладнання Тоoway та схема його підключення.....   | 72        |

|  | стор.  |            |
|--|--|------------|
| 3.4                                    | Можливості супутникового модему Tooway (IDU).....                                | 75         |
| 3.5                                    | Експлуатація терміналу супутникового зв'язку Tooway.....                         | 75         |
| 3.5.1                                  | Визначення номера променя покриття, кута місця<br>(елевації), азимуту.....       | 76         |
| 3.5.2                                  | Збирання конструкції антени.....   | 78         |
| 3.5.3                                  | Вибір місця установки антени.....  | 79         |
| 3.5.4                                  | Юстування антени.....  | 81         |
| 3.5.5                                  | Налаштування модему.....   | 85         |
| 3.5.6                                  | Активація терміналу.....   | 87         |
| 3.6                                    | Глобальна супутникова система Starlink.....                                      | 89         |
| 3.6.1                                  | Технічні характеристики супутникової системи<br>Starlink.....                    | 92         |
| 3.6.2                                  | Користувацькі термінали та наземні станції<br>супутникової системи Starlink..... | 95         |
| 3.7                                    | Система персонального супутникового зв'язку Thuraya.....                         | 99         |
| 3.8                                    | Система супутникового зв'язку Inmarsat.....                                      | 105        |
| 3.9                                    | Система супутникового зв'язку Iridium.....                                       | 116        |
| 3.10                                   | Експлуатація портативного супутникового терміналу<br>Hughes 4200.....            | 121        |
| 3.11                                   | Досвід забезпечення супутниковим зв'язком під час<br>проведення бойових дій..... | 133        |
|  | Питання для самоконтролю до розділу 3.....                                       | 141        |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b> |  | <b>143</b> |
| <b>ДЛЯ НОТАТОК.....</b>                |  | <b>145</b> |



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

---

КЗІ – криптографічний захист інформації  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
МСЕ – Міжнародний союз електрозв'язку  
ОПП – опорно-поворотний пристрій  
ПК – персональний комп'ютер  
ТМЗК – телефонна мережа загального користування  
ФКЗ – Федеральна комісія зв'язку США  
АЕНФ (Advanced Extremely High Frequency) – сучасна високочастотна супутникова система  
АРАС (Asia-Pacific region) – Азіатсько-Тихоокеанський регіон  
APN (Access Point Name) – ім'я точки доступу  
APSK (Amplitude and Phase-Shift Keying) – амплітудно-фазова маніпуляція  
ASIC (Application Specific Integrated Circuit) – інтегральна схема для конкретного застосування  
AVC (Advanced Video Coding) – удосконалене кодування відео зображень)  
ATM (Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний спосіб передачі даних  
BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) – код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема  
BDC (Block Down Converter) – підсилювач з пониженням частоти  
BGAN (Broadband Global Access Network) – широкосмугова глобальна мережа доступу  
BPSK (Binary Phase Shift Keying) – двійкова фазова маніпуляція  
BSS (Broadcast Satellite Service) – супутникове мовлення  
BUC (Block Up Converter) – підсилювач з підвищенням частоти  
CDMA (Code Division Multiple Access) – множинний доступ з кодовим розділенням  
CI (System International d'Unites) – Міжнародна система одиниць  
DAMA (Demand Access Multiple Access) – множинний доступ за доступом по запиту  
DBS (Direct Broadcast Service) – послуга прямої трансляції  
DRO (Dielectric Resonator Oscillator) – генератор з діелектричним резонатором  
DSP (Digital Signal Processor) – цифровий сигнальний процесор  
DTH (Direct to Home) – супутникове мовлення для операторів телевізійного мовлення  
DVB-S2 (Digital Video Broadcasting-Standard 2) – стандарт супутникового цифрового телебачення

EMEA (Europe, the Middle East and Africa) – Європа, Близький Схід і Африка

ESAP (European S-band Application Process) – Європейське рішення про встановлення єдиного процесу відбору та авторизації

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів

FEC (Forward Error Correction) – пряма корекція помилок

FSS (Fixed Satellite Service) – фіксована супутникова служба зв'язку

GAN (Global Area Network) – глобальна мережа

GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System) – глобальна морська система зв'язку при аварії і для забезпечення безпеки

GPRS (General Packet Radio Service) – пакетний радіозв'язок загального користування

GPS (Global Positioning System) – глобальна система визначення місця знаходження

GSM (Global System for Mobile Communications) – міжнародний стандарт для мобільного цифрового стільникового зв'язку

HEO (Highly Elliptical Orbits) – сильно витягнуті еліптичні орбіти

HEVC (High Efficiency Video Coding) – високоефективне кодування відео зображень

HDTV (High Digital Television) – телемовлення високої якості

HPA (High-Power Amplifiers) – підсилювачі високої потужності

HTS (High Throughput Satellites) – висока пропускна здатність каналу прийому-передачі

HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) – протокол передачі гіпертексту

ICE (Inmarsat Communications Evolution) – партнерство з промисловими партнерами, призначене для визначення інноваційних технологій, які можуть розширити можливості супутникового зв'язку наступного покоління

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки

IoT (Internet of Things) – Інтернет речей

IP (Internet Protocol) – маршрутизований протокол мережевого рівня стека TCP/IP

IPDS (Inmarsat Packet Data Service) – служба пакетної передачі даних Inmarsat

IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) – спектрограф із зображенням області інтерфейсу

ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифрова мережа з інтегрованими послугами

ITU (International Telecommunication Union) – Міжнародний союз електрозв'язку

LAN (Local Area Network) – локальна обчислювальна мережа

LDPC (Low Density Parity Check Codes) – код з малою щільністю перевірок на парність

LNA (Low Noise Amplifier) – підсилювач з низьким рівнем шуму

LNBD (Low Noise Block Downconverter) – малошумовий підсилювач з пониженням частоти

LOS (Line-of-Sight) – лінія прямої видимості

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – метод просторового кодування сигналу

MMSS (Maritime Mobile Satellite Service) – супутникова послуга морського мобільного зв'язку

MPDS (Mobile Packet Data Service) – служба мобільної пакетної передачі даних

MPEG (Moving Picture Experts Group) – група спеціалістів, що утворена міжнародною організацією ISO для розроблення стандартів стискування і передачі цифрових відео - та аудіо інформації.

MSS (Mobile Satellite Service) – супутникова послуга мобільного зв'язку

OSIRM (Open Systems Interconnection Reference Model) – еталонна модель взаємодії відкритих систем

OTT video (Over-The-Top Video) – відео в Інтернеті

OU (Occasional Use) – періодичне використання

PA (Power Amplifiers) – підсилювач потужності

PEP (Performance Enhancing Proxy) – проксі сервер для підвищення продуктивності

PLL (Phased Locked Loop) – фазове автопідлаштування частоти

POS (Point of Sale) – точка продаж

POTS (Plain Old Telephone Service) – простий старий телефонний сервіс

PSK (Phase Shift Keying) – фазова маніпуляція

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурна амплітудна маніпуляція

QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) – квадратурно-фазова маніпуляція

RP (Radio Regulations) – регламент радіозв'язку

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – наглядний контроль та збір даних

SDTV (Standard Digital Television) – телемовлення стандартної якості

SHF (Super High Frequency) – надвисока частота

SIP (Session Initiation Protocol) – протокол встановлення сеансу

SNG (Satellite News Gathering) – збір даних з використанням супутникових систем

SNR (Signal-to-Noise Ratio) – відношення сигнал/шум

SOC (Satellite Operations Center) – центр керування і контролю працездатності супутника

SS (Sun Synchronous) – особлива геліосинхронна орбіта

SSPA (Solid State Power Amplifier) – твердотілий підсилювач потужності

TCP (Transmission Control Protocol) – протокол керування передачею

TDMA (Time Division Multiple Access) – множинний доступ з розділенням по часу

UCC (Unified Combatant Commanders) – об'єднане бойове командування

UHDTV (Ultra High Definition Television) – телебачення ультрависокої якості

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) – універсальна мобільна телекомунікаційна система

USIM (Universal Subscriber Identity Module) – універсальний модуль ідентифікації абонента

VoIP (Voice Over Internet Protocol) – технологія передачі медіа-даних у реальному часі за допомогою сімейства протоколів TCP/IP

VPN (Virtual Private Network) – віртуальна приватна мережа

VSAT (Very Small Aperture Terminal) – термінал з досить малою апертурою антени

WPA (Wi-Fi Protected Access) – програма сертифікації пристроїв безпроводного зв'язку

## ВСТУП

---

Супутникові системи зв'язку, охоплюють своїми послугами дистанційне зондування Землі, комерційну та військову сфери. Забезпечують важливі глобальні можливості підключення та спостереження, підтримку мобільного зв'язку у вигляді доступу до Інтернету і телеметрії в режимі реального часу з літаків та кораблів.

Швидкі темпи розвитку супутникових систем зв'язку обумовлені перевагами якими вони наділені. До них, зокрема, відноситься висока якість та надійність каналів зв'язку, велика пропускна здатність, необмежені площини покриття та конфіденційність зв'язку. Дані переваги, які визначають їхні широкі можливості, роблять їх унікальними і ефективними засобами зв'язку. Супутниковий зв'язок нині є одним з основних видів міжнародного і військового зв'язку на великі та середні відстані. Використання супутників Землі в організації зв'язку продовжує розширюватися з розвитком існуючих телекомунікаційних мереж. Багато країн створюють власні національні мережі супутникового зв'язку. Сьогодні на орбіті Землі знаходиться більше 900 супутників.

Відповідно до Регламенту радіозв'язку залежно від призначення супутникової системи зв'язку і типу використовуваних наземних станцій розрізняють чотири основні служби супутникового зв'язку: фіксований супутниковий зв'язок; супутникове мовлення; супутникова служба мобільного зв'язку; супутникова служба морського мобільного зв'язку.

У телерадіомовленні, де потрібне суцільне покриття переваги супутникових систем зв'язку перед іншими системами виявляються найбільшою мірою. В результаті переходу на цифрові методи передачі телевізійних сигналів виникла нова послуга – інтерактивне телебачення. Порівняно недавно зародилася також ідея персоналізації у сфері телемовлення, тобто можливість інтерактивного обміну в процесі телепередач і задоволення індивідуальних запитів за рахунок трансляції по закритих каналах замовлених телепрограм. У цьому разі користувач перетворюється з пасивного користувача в активного учасника телепрограм. Сьогодні очевидне збільшення кількості програм, яке відбувається у тому числі й за рахунок створення каналів безпосереднього супутникового радіомовлення.

## ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 1.1 Загальні відомості

Супутниковий зв'язок базується на системі односторонньої або двохсторонньої передачі радіочастотних сигналів по лінії прямої видимості LOS (Line-of-Sight), яка складається з передавальної станції, що використовує канал лінії зв'язку “вгору”, супутникової системи, яка знаходиться у космосі та працює в якості вузла відновлення сигналу, а також однієї або декількох приймальних станцій, які зайняті моніторингом каналу зв'язку “вниз” з метою прийому інформації. У випадку двохстороннього зв'язку, обидві кінцеві станції наділені функціями передачі та прийому сигналів (рис. 1.1).

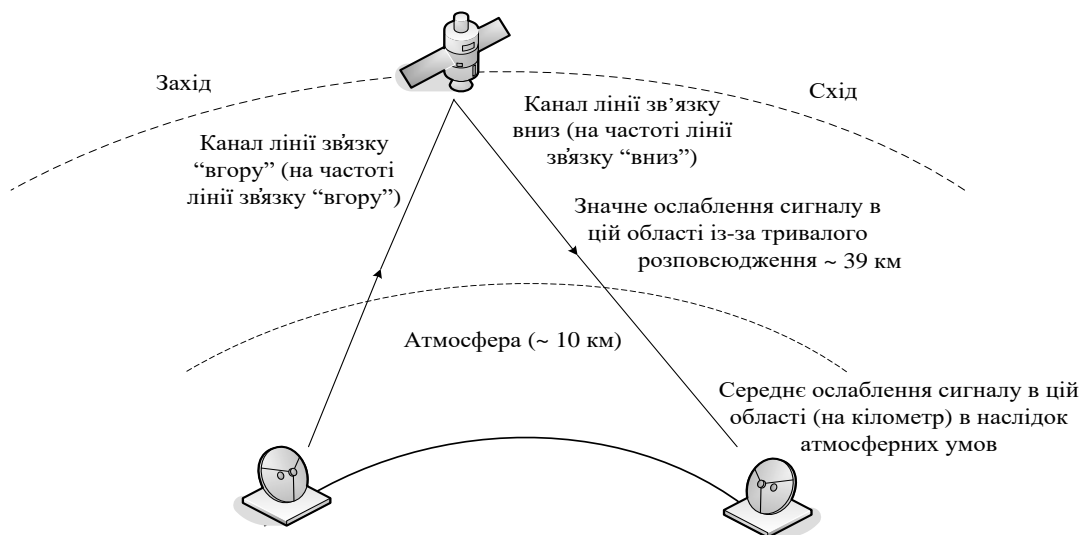


Рисунок 1.1 – Типова структура системи супутникового зв'язку

Супутники можуть знаходитися на різних навколосеземних орбітах. *Геостаціонарна орбіта* є круговою орбітою в площині Землі на висоті 35786 км від поверхні Землі (42164 км від центра Землі, радіус Землі складає 6378 км). Супутники обертаються на геостаціонарній орбіті навколо Землі з її кутовою швидкістю і в однаковому напрямку. Коли супутник знаходиться на цій орбіті в площині екватора, при спостереженні за ним із земної поверхні складається уявлення, що він залишається нерухомим, тому не має необхідності відслідковувати цей супутник

антенною, що направлена на нього або позиційним коректуванням з періодичними інтервалами часу.

Геостаціонарна орбіта є круговою орбітою, по якій супутник здійснює орбітальний рух в тому ж напрямку, що і небесне тіло, розміщений в екваторіальній площині з орбітальним періодом, що дорівнює періоду обертання Землі. Також можлива робота супутникового зв'язку на інших орбітах: *середній* і *низькій* навколоземних орбітах.

Традиційно, супутникові послуги офіційно класифікують за наступними категоріями:

*Фіксована супутникова служба зв'язку FSS (Fixed Satellite Service)* – це супутникова служба, що здійснює зв'язок між супутниковими терміналами, які розташовані в певних фіксованих точках, за допомогою одного або декількох супутників. Як правило, FSS задіяна для передачі відео, голосу та даних протоколу IP на великі відстані з фіксованих точок. Вона використовує геостаціонарні супутники з фіксованими наземними станціями. Сигнали передаються від однієї точки на земній кулі до іншої (точка-точка), так і від одного передавача до декількох приймачів (точка-багато точкове з'єднання). FSS може включати в себе зв'язок типу супутник-супутник (рідко розповсюджена в комерційній сфері) або у вигляді фідерних з'єднань для інших супутникових послуг, таких як супутникова служба мобільного зв'язку або супутникова служба мовлення.

*Супутникова служба мовлення BSS (Broadcast Satellite Service)* – супутникова служба, яка підтримує передачу та прийом сигналів, що призначені для безпосереднього прийому споживачами. Найкращим прикладом є послуга прямої трансляції DBS (Direct Broadcast Service), яка підтримує пряму трансляцію теле- і аудіо каналів в будинках або бізнес-офісах безпосередньо із супутників в певній смузі частот. BSS/DBS використовують геостаціонарні супутники. На відміну від FSS, яка має зв'язок як точка-точка, так і точка-багато точкове з'єднання, BSS надає послуги зв'язку тільки типу точка-багато точкове з'єднання. Відповідно, для обслуговування цього ринку телекомунікаційних послуг необхідна менша кількість супутників.

*Супутникова служба мобільного зв'язку MSS (Mobile Satellite Service)* – супутникова служба, що забезпечує безпроводовий зв'язок в будь якій точці земної кулі. Завдяки широкому розповсюдженню мобільних телефонів, користувачі почали сприймати можливість використання мобільного телефону в будь-якій точці світу, в тому числі в



сільській місцевості. MSS є супутниковою службою, яка розширює цю можливість. Для прикладних програм телефонії необхідно мати спеціально налаштований телефон. Зазвичай MSS використовують супутникові системи на середніх та низьких навколосемних орбітах.

*Супутникова служба морського мобільного зв'язку* MMSS (Maritime Mobile Satellite Service) – супутникова служба, яка здійснює зв'язок між мобільними наземними станціями супутникового зв'язку і одним або декількома супутниками.

Глобальна система визначення місця знаходження GPS (Global Positioning System) – служба, що використовує сузір'я супутників для забезпечення належним чином обладнаних терміналів інформацією про глобальне позиціонування.

На даний час ефективно використання спектра є актуальним серед кінцевих користувачів, щоб підтримувати економічну основу розповсюдження контенту. У той же час для збереження зростання продажів провайдери зосередилися на наданні послуг в області IP-телефонії VoIP (Voice Over Internet Protocol), Інтернет-трафіка, відео наступного покоління (гібридне розподілення, відео з часовою маніпуляцією, тощо), а також мобільного зв'язку.

Провайдери супутникового зв'язку постійно прагнуть до забезпечення більш високої загальної пропускної здатності супутникового каналу і системи (в цілому). Вдосконалені схеми маніпуляції дозволяють збільшити пропускну здатність каналу: передові методи маніпуляції і кодування (medcod) вводяться в якості стандартизованих рішень, вбудовані в модеми нового покоління забезпечують передачу великої кількості бітів в секунду на одиницю спектра, а адаптивне кодування дозволяє ефективніше використовувати більш високочастотні діапазони, які по своїй природі схильні до ослаблення сигналу (як приклад, внаслідок дощових опадів). На даний час впроваджують ряд розширень для давно затвердженого стандарту супутникового цифрового телебачення DVB-S2 (Digital Video Broadcasting-Standart 2).

Висока пропускна здатність також досягається:

- за рахунок використання вузькоспрямованих головних пелюстків діаграми спрямованості (ДС) антен на супутниках з високою пропускною здатністю каналу прийому-передачі HTS (High Throughput Satellites), як правило, працюючих в Ka-діапазоні (17,7–18,8 ГГц та 19,7–20,2 ГГц для



частот ліній зв'язку “вниз” і 27,5–28,6 ГГц та 29,5–30 ГГц для частот ліній зв'язку “вгору”);

- за рахунок скорочення часу очікування передачі (завдяки використанню супутників на середній навколоземній орбіті). HTS здатні підтримувати вихідну сумарну пропускну здатність на рівні більше 100 Гбіт і, таким чином, значно знизити загальні витрати з розрахунку на біт, шляхом використання направлених вузькоспрямованих головних пелюстків ДС антени супутника високої потужності. Системи і можливості HTS можуть бути використані провайдерами, щоб розширити спектр своїх послуг супутникового зв'язку. HTS відрізняються від традиційних супутників у різних аспектах, а саме: за рахунок використання ретрансляторів високої пропускну здатності до 100 МГц або більше; за рахунок використання наземних станцій-ретрансляторів, які підтримують один або два десятка промінів (з вимогою до пропускну здатності 5 Гбіт/с); за рахунок високої пропускну здатності кожної віддаленої станції та застосуванням передових методів вирішення проблеми ослаблення сигналу під час опадів, особливо для систем, що працюють в Ка-діапазоні.

Надання послуг зв'язку людям, що знаходяться в дорозі, наприклад, що подорожують по морю або в повітрі, там де відсутнє наземне підключення, в даний час є технічно можливим і фінансово вигідним для провайдерів послуг супутникового зв'язку. Коли ця послуга необхідна на швидкісних літаках, необхідно брати до уваги конструктивні особливості спеціальних антен (наприклад, слідкуючих антен).

Підключення M2M (машина-машина) для вантажних автомобілів під час трансконтинентальних рейсів, збір телеметричної інформації літаків в режимі реального часу або відстеження даних про пересування торгових кораблів відкриває нові можливості для розширення інтернету речей IoT (Internet of Things) для широко розподілених об'єктів. Вимоги до морського зв'язку можуть бути різними в залежності від типу корабля, компанії-оператора, об'єму даних, потреб екіпажу і пасажирів та прикладних програм, що використовуються (в тому числі Глобальної морської системи зв'язку при аварії і для забезпечення безпеки GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System)).

Нове телебачення ультрависокої якості UHD TV (Ultra High Definition Television) (також відоме як Ultra HD або UHD) забезпечує якість відео, яке еквівалентне 8–16 екранам HDTV (High Definition Television).

Зрозуміло, що це вимагає досить високої пропускної здатності для кожного каналу. З'являються так звані 4К і 8К версії на основі роздільної здатності відео по вертикалі. Супутникові оператори планують позиціонувати себе в цьому сегменті ринку з позиції надання загальнодоступних послуг, і більш цілеспрямованих передач. UHD TV потребують пропускну здатність близько 60 Мбіт/с для послуг по розповсюдженню сигналу і 100 Мбіт/с для відповідних послуг. Використання стандарту DVB-S2 (і, можливо, ретрансляторів з більш широкою смугою пропускання, наприклад, на 72 МГц) буде загальною вимогою. Новий стандарт стиснення відео (алгоритм) H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding – високоефективне кодування відео зображень) забезпечує в два рази більшу ефективність стиснення в порівнянні з базовим алгоритмом H.264/AVC (Advanced Video Coding – удосконалене кодування відео зображень). Тим не менш він також підвищує складність обчислень, які вимагають набір більш сучасних мікросхем. В останні роки було розроблено багато методів демонстрації та моделювання, особливо в 2015 році. Навіть в контексті стандартного відео (SD)/ відео високої якості (HD) оновлення обладнання для кодування наземних станцій провайдера (H.264 HEVC) знижує вимоги до пропускної здатності до 50%. Оновлення з DVB-S2 до DVB-S2X може зменшити пропускну здатність додатково на 10–60%.

Гібридні мережі, що об'єднують супутникові та наземні підключення (особливо IP-мережі), будуть відігравати важливу роль в найближчому майбутньому. Широке впровадження IP-послуг, в тому числі IPTV (Internet Protocol TV) і відео в Інтернеті OTT video (Over-The-Top Video), обумовлено впершу чергу розгортанням оптоволоконних ліній зв'язку, в кінцевому рахунку, змінить дану індустрію. Наприклад, IP-протокол версії (IPv6) представляє собою технологію, яка в даний час розгорнута в різних частинах світу та дозволяє здійснювати пряму адресацію між кінцевими пристроями. Інтеграція супутникового зв'язку та можливостей IPv6 дозволить забезпечити основу створення мереж гібридної інфраструктури, яка зможе обслуговувати зростаючі потреби в уряді, серед військових, IPTV й агентів мобільного відео, і це далеко не всі зацікавлені сторони.

На рівні базової технології вивчаються і, по суті, розробляються електричні двигуни для космічних апаратів; такі підходи до конструкції двигунів можуть зменшити масу космічних апаратів (а також і вартість

запуску) і, можливо, продовжити термін експлуатації космічного апарату. Згідно думки прихильників цієї концепції, використання електричного ракетного двигуна для утримання супутника в заданій точці орбіти вже змінило глобальну супутникову індустрію та дозволяє здійснювати дозаправку супутника паливом на орбіті та збільшити висоту його орбіти. Крім того, на ринок виходять нові пускові платформи, знову ж таки з метою зниження вартості запуску за рахунок збільшення конкуренції.

Таким чином, очевидно, що супутниковий зв'язок відіграє та буде продовжувати відігравати ключову роль в комерційних, TV/ЗМІ, урядових і військових комунікаціях із-за своїх власних можливостей багато адресної/ широкомовної передачі, аспектів мобільного зв'язку, глобального охоплення, надійності та здатності швидко підтримувати зв'язок у відкритому просторі та агресивних середовищах [1].

## 1.2 Супутникові орбіти

Супутники зв'язку здійснюють обертання навколо Землі по чітко визначеним орбітам. В табл. 1.1 ([2], [3]) перераховані деякі ключові поняття, що пов'язані з супутниковими орбітами. На рис. 1.2 зображено різні супутникові орбіти, які знаходяться в загальному користуванні. Більшість комерційних супутників постійно знаходяться на геостаціонарній орбіті. З практичної точки зору, геостаціонарна орбіта має невеликий ненульовий нахил та ексцентриситет, що дозволяє супутнику рухатися по невеликій, проте керованій траєкторії у вигляді “вісімки”.

На рис. 1.3 зображена хронологія запуску спареного набору супутників, що складена на основі матеріалів ILS (International Launch Services).

При штатній роботі супутники “зберігають стаціонарне положення” в межах певного “поля” навколо наземної орбітальної позиції; з часом (при наближенні строку експлуатації супутника – зазвичай через 15–18 років після запуску) супутнику “дозволяється” ввійти на похилу орбіту в безпосередню близькість від визначеної орбітальної позиції (якщо його не переміщують на іншу позицію на геостаціонарній орбіті для обслуговування). Маневрування північ-південь для утримання супутника в центральному полі не виконується (для економії палива), проте виконують маневрування схід-захід, щоб зберегти орбітальну позицію.

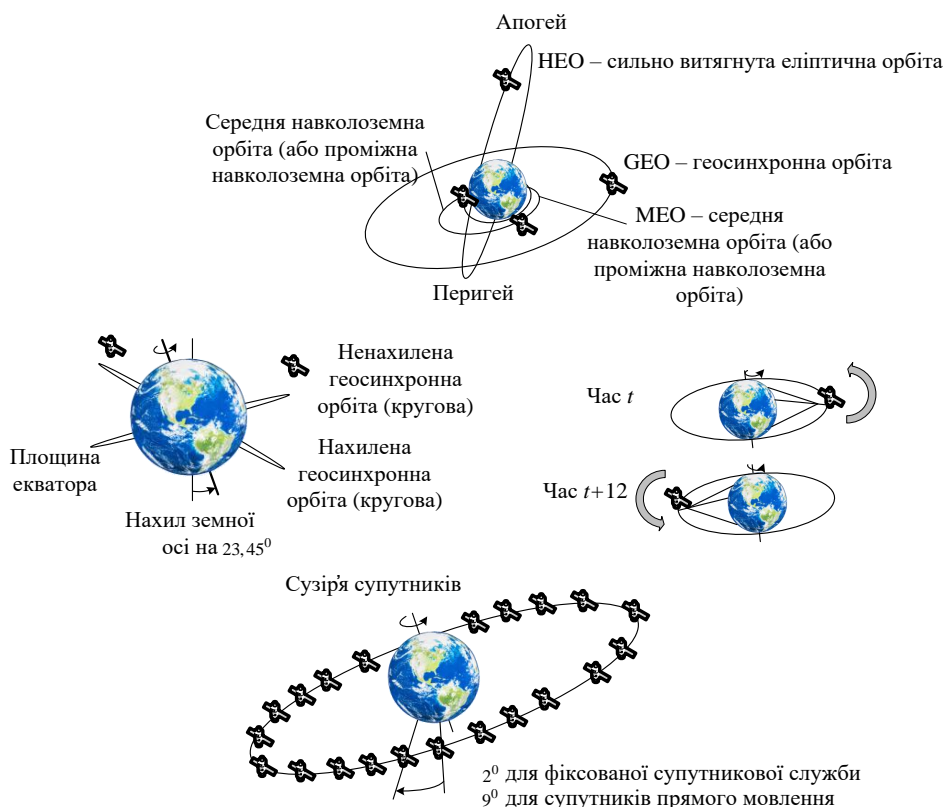


Рисунок 1.2 – Супутникові орбіти, що знаходяться в загальному користуванні

Орбітальні позиції визначаються міжнародними правилами як значення довготи на геосинхронному колі, наприклад  $101^\circ$  з.д.,  $129^\circ$  з.д. і т.д. На даний час супутники рознесені на  $2^\circ$  (або  $9^\circ$  для DBS), щоб забезпечити достатнє розділення для підтримки повторного використання частот, хоча в деяких випадках сузір'я супутників може бути сконцентровано (практично) в одному місці (проте кожний з них використовує інший частотний спектр). В дійсності, орбітальна позиція є “полем” розміром приблизно 150 км на 150 км, в межах якого супутник знаходиться в режимі веденні земного контролю. Супутники не на геостационарній орбіті використовуються для впровадження радіо послуг супутникового зв'язку, GPS зондування Землі, а також для вирішення військових задач. Середні-навколоземні орбіти або низько навколоземні орбіти збільшують пропускну здатність мережі, зменшують витрати й у взаємодії з більш сучасними наземними антенами забезпечують неперервне обслуговування (насправді, це і є аргумент, щоб за допомогою декількох супутників забезпечити можливість швидкого відновлення сигналу у випадку аварії).

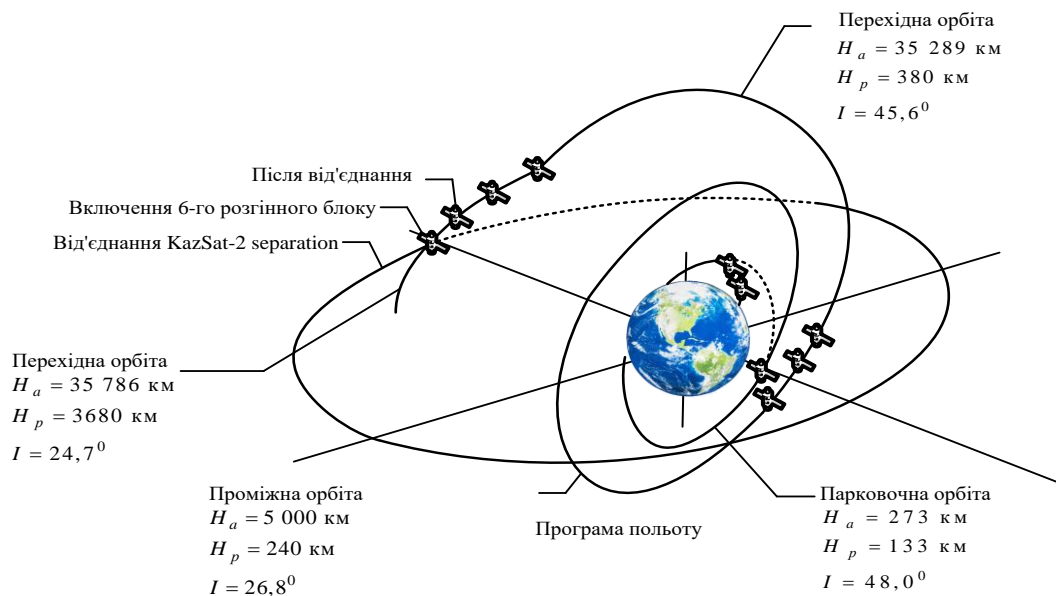


Рисунок 1.3 – Запуск космічного апарату (на основі матеріалів ILS)

Таблиця 1.1

|                      |   |
|----------------------|---|
| Колова орбіта        | Орбіта супутника, на якій відстань між центрами мас супутника і Землі – постійні.   |
| Пояс (орбіта) Кларка | Колова (геостаціонарна) орбіта на висоті приблизно 35786 км над екватором, по якій супутники рухаються з тією ж кутовою швидкістю, що і Земля у ході свого руху, тому вони здаються нерухомими при спостереганні за ними із Землі (термін отримав назву в честь Артура Кларка, який першим описав концепцію геостаціонарних супутників зв'язку)   |
| Зсунуті супутники    | Два або більше супутників, які приблизно займають одну і туж позицію на геостаціонарній орбіті таким чином, що кутова відстань між ними є фактично нульовою, якщо спостерігати із Землі. Невелика приймальна антена буде сприймати супутники як зміщені; в дійсності, супутники знаходяться в декількох кілометрах один від одного в просторі, щоб уникнути зіткнення. На цих супутниках використовують різні робочі частоти або поляризацію сигналу. |

Продовження таблиці 1.1

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Геліосинхронна орбіта    | Особлива геліосинхронна SS (Sun Synchronous) орбіта, на якій супутник постійно рухається за тінню Землі. Оскільки супутник ніколи не переходить в цю тінь, він завжди знаходиться на сонячному світлі. Тому такі супутники можуть в основному працювати на сонячній енергії, а не від батарей; вони корисні для сільського господарства, океанографії, лісничого господарства, гідрології, геології, картографії та метеорології.  |
| Геостаціонарна орбіта    | Геостаціонарна орбіта – це колова орбіта, яка орієнтована в площині екватора Землі. Геостаціонарний супутник здійснює один оберт по орбіті навколо Землі кожні 24 години. Відповідно, враховуючи, що супутник – це космічний апарат, який обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і Земля, він постійно знаходиться над однією та тією ж точкою земної кулі (якщо тільки оператор не змінить його позицію). Максимальна зона обслуговування геостаціонарного супутника покриває майже одну третину поверхні Землі. На практиці, за винятком океанічних супутників, більшість супутників мають зону покриття, що оптимізована для континенту або частини континенту (наприклад, Північна Америка або навіть континентальна частина США). |
| Геостаціонарний супутник | Супутник, що знаходиться на навколосемній орбіті, яка рухається з тією ж швидкістю, що і Земля, з земної поверхні він виглядає нерухомим.  |
| Нахил                    | Кут між площиною орбіти супутника і поверхнею екватора Землі. Орбіта ідеального геостаціонарного супутника має нахил $0^0$ .   |
| Нахилена орбіта          | Орбіта, яка по своїм параметрам наближається до геостаціонарної, проте її площина має невеликий нахил по відношенню до екваторіальної площини. Якщо дивитися з поверхні Землі, складається враження, що супутник рухається в своїй номінальній позиції по добовій траєкторії у вигляді “вісімки”. Супутникам часто доводиться дрейфувати по нахиленій орбіті, ближче до кінця їх номінального терміну експлуатації, з метою економії палива на борту, яке в іншому випадку використовувалося б для корекції цього дрейфу, викликаного притягінням Сонця та Місяця. Маневри північ-південь не проводяться, щоб слідувати по орбіті, яка повинна бути сильно нахилена.   |

Продовження таблиці 1.1

|   |  |
|---|--|
| <p>Сильно витягнуті еліптичні орбіти (HEO – Highly Elliptical Orbits)</p> | <p>HEO зазвичай мають:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перигей – це точка на кожній орбіті, яка знаходиться найближче до Землі (500 км над поверхнею Землі);</li> <li>- апогей – це точка на орбіті, яка є самою віддаленою від Землі 50 000 км (над поверхнею Землі). Орбіти нахилені під кутом <math>63,4^{\circ}</math> з метою надання послуг зв'язку в місцях, що розташовані в високих північних широтах. Період обертання знаходиться в межах від 8 до 24 годин. Завдяки високому ексцентриситету орбіти, супутник проводить приблизно дві третини орбітального періоду поблизу апогея, і на протязі цього часу знаходиться майже нерухомим для спостерігачів на Землі (це явище називається затримкою апогея). Добре спроектована система HEO розміщує кожний апогей у відповідності з необхідною зоною обслуговування. Після проходження супутником апогейного періоду орбіти відбувається переключення на інший супутник на тій же орбіті, щоб виключити можливі втрати зв'язку. Із-за відносно великого переміщення супутника на HEO по відношенню до спостерігача на Землі, супутникові системи, що використовують даний тип орбіт, повинні компенсувати доплерівський зсув частоти несучої радіоканалу.</li> </ul> |
| <p>Середні навкоземні/проміжні колові орбіти</p>                          | <p>Дані колові орбіти знаходяться на висоті приблизно 10 000 км. Їхній період складає приблизно 6 годин. Максимальний час, на протязі якого супутник на середній навкоземній орбіті знаходиться вище місцевого горизонту для спостерігача на Землі, складає декілька годин. Для досягнення глобальної зони охоплення глобальна система зв'язку з використанням цього типу орбіт вимагає невеликої кількості супутників в двох або трьох орбітальних площинах. Американська система GPS є прикладом системи супутників на середній навкоземній орбіті.</p>  |
| <p>Орбіта</p>   | <p>Шлях, що описаний центром мас супутника в просторі, під впливом гравітаційного тяжіння, проте час від часу і низько енергетичних коректуючих сил (двигуном), для підтримки необхідної траєкторії руху супутника.</p>  |
| <p>Орбітальна площина</p>   | <p>Площина, в якій знаходиться центр маси Землі і вектор швидкості (напрямок руху) супутника.</p>  |



Продовження таблиці 1.1

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <p>Низька навколоземна орбіта</p> | <p>Низька навколоземна орбіта представляє собою еліптичну, або кругову орбіту, яка знаходиться на висоті 2000 км або менше над поверхнею Землі. Період орбіти на цих висотах коливається в межах від 90 хв. до 2 год., а максимальний час, на протязі якого супутник на низькій навколоземній орбіті знаходиться над місцевим горизонтом для спостерігача на Землі, складає до 20 хв. При знаходженні на низькій навколоземній орбіті існують довгі періоди, на протязі яких даний супутник знаходиться не в полі зору конкретної наземної станції. Це може виявитися корисним для деяких прикладних програм, наприклад, для моніторингу наземної поверхні. Зона радіовидимості може бути розширена за рахунок розгортання більше одного супутника і в декількох орбітальних площинах. Повна глобальна система дії радіозв'язку з використанням низької навколоземної орбіти вимагає великої кількості супутників (40–80), які знаходяться в декількох орбітальних площинах і на різних нахилених орбітах. Більшість малих систем з супутниками на низьких навколоземних орбітах використовують полярні або приполярні орбіти. Із-за відносно великої швидкості супутника по низькій навколоземній орбіті по відношенню до спостерігача на Землі супутникові системи, що використовують даний тип орбіти, повинні бути в стані компенсувати доплерівські зсуви частоти. Супутникам на низькій навколоземній орбіті також доводиться долати опір атмосфери, що викликає погіршення параметрів орбіти (термін перебування супутника на низькій навколоземній орбіті складає 5–8 років, в той час як термін перебування на геостаціонарній орбіті – 14–18 років. Проте запуски супутників на низьку навколоземну орбіту менш витратні, ніж на геостаціонарну орбіту, а із-за їхньої більш легшої маси за один пуск можна одночасно запустити декілька супутників на низьку навколоземну орбіту).</p> |
| <p>Полярна орбіта</p>             | <p>Полярна орбіта є низькою навколоземною орбітою, яка знаходиться в площині двох полюсів. Їх прикладні програми включають в себе можливість огляду тільки полюсів (наприклад, заповнити пробіли в зоні охоплення супутників на геостаціонарній орбіті) або перегляд одного й того ж місця на Землі визначений час кожної доби. Розміщуючи супутник на висоті приблизно 850 км, можна досягти періоду полярної орбіти приблизно 100 хв.</p>   |



Продовження таблиці 1.1

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <p>Геліосинхронна (SS) орбіта</p> | <p>Особлива полярна орбіта, рухаючись по якій супутник перетинає екватор і кожний градус широти в один і той же час доби. Дана орбіта значно полегшує збір даних. Супутники на полярних орбітах в основному використовуються для зондування Землі. Як правило, такий супутник рухається на висоті 1000 км. Кут між площиною геліосинхронної орбіти та Сонцем залишається постійним. Рух по цій орбіті може бути досягнутий шляхом відповідного вибору орбітальної висоти, ексцентриситет і нахил, призводить до обертання вузла приблизно в <math>1^{\circ}</math> на схід кожний день, що дорівнює видимому руху Сонця, ця умова може бути досягнута тільки для супутника на ретроградній орбіті. Геліосинхронна полярна орбіта широко використовується для моніторингу Землі, тому що кожний день по мірі обертання Землі вся її поверхня буде знаходитися в зоні огляду супутника, тому він буде здійснювати огляд одного і того ж місця в один і той же час кожної доби. Всі геліосинхронні орбіти є полярними, проте не всі полярні орбіти є геліосинхронними.</p> |
|-----------------------------------|---|

Основним наслідком руху супутника по геостаціонарній орбіті є затримка розповсюдження сигналів, що становить не менше 119 мс в лінії зв'язку “вгору” (більше для наземних станцій в північних широтах або для наземних станцій, які знаходяться на лінії видимості супутника), і не менше 238 мс в лінії зв'язку “вгору” та “вниз” або для односторонньої передачі. В залежності від місця знаходження земної станції і цільового супутника, довжина шляху розповсюдження (і, відповідно, затримка розповсюдження сигналу) може змінюватися на декілька тисяч кілометрів (наприклад, для супутника на  $101^{\circ}$  з.д. і антени Denver Co. “похила” дальність складає 37 571,99 км; для антени Van Buren та ME дальність складає 38 959,54 км). Двохсторонній інтерактивний сеанс з типовим протоколом зв'язку, таким як протокол керування передачею TCP (Transmission Control Protocol) буде мати затримку двічі більшу на протязі кожного періоду (не менше ніж 476 мс), так як інформація проходить двічі на супутник і назад. Односторонні чи мовні (передача відео або даних) прикладні програми легко вирішують дану проблему, оскільки затримка непомітна для глядача відео контенту або користувача мережі Інтернет. Проте, інтерактивні прикладні програми передачі даних і транзитні з'єднання передачі голосу, зазвичай повинні приймати і підлаштовуватися

до цього складного становища. Супутникові вузли компенсації затримки і технології імітації з'єднання були вдало використані для компенсації цих затримок в схемах передачі даних. Передача голосу через супутник в даний час складає лише невелику частину від загальної потужності транспондера, а користувачам необхідно боротися з затримкою сигналу супутника індивідуально в кожному окремому випадку [1].

### 1.3 Діапазон робочих частот супутника ретрансляції даних

Супутниковий канал зв'язку є каналом радіозв'язку між передавальною і приймальною наземними станціями безпосередньо через супутник зв'язку. Таким чином на супутнику розміщується прийомо-передавач (транспондер, ретранслятор) з відповідними приймальними і передавальними антенами, і такий супутник виконує функцію супутника-ретранслятора. Супутниковий канал зв'язку складається з лінії зв'язку “вгору” та “вниз”; супутникове електронне обладнання (тобто транспондер) буде перетворювати частоту лінії зв'язку “вгору” в частоту лінії зв'язку “вниз”. Канал передачі супутникової системи є радіоканалом, що працює в конкретних радіочастотних діапазонах у межах загального електромагнітного поля (рис. 1.4 [4]). Табл. 1.2, 1.3 містить відомості про деякі ключові фізичні параметри, що мають відношення до супутникового зв'язку. Робоча частота є надвисокою частотою SHF (Super High Frequency) діапазону (3–30 ГГц). Регулювання і практика визначають робочу частоту, пропускну здатність каналу, а також смугу пропускання підканалів в межах великого каналу. Для лінії зв'язку “вгору” та “вниз” використовують різні частоти.

Частоти вище 30 МГц здатні проходити через іоносферу та можуть використовуватися для здійснення зв'язку з супутниками (частоти нижче 30 МГц відбиваються від іоносфери на певних етапах циклу сонячної активності, проте комерційні супутникові служби використовують більш високі частоти). Діапазон 3–30 ГГц представляє собою корисний набір частот для геостаціонарного супутникового зв'язку; ці частоти також називають надвисокими частотами. Частоти від 30 до 300 ГГц називаються частотами “міліметрового” діапазону; вище 300 ГГц на перший план

виходять оптичні методи, їх називають частотами “дальнього інфрачервоного діапазону” або “квазіоптичні частоти” [5]. У військовій сфері з’являються нові прикладні програми: сучасна високочастотна супутникова система АЕНФ (Advanced Extremely High Frequency), що представляє собою систему об’єднаної служби супутникового зв’язку уряду США та складається з чотирьох супутників (три з яких були запуснені в 2014 році), використовує спектр надвисоких частот; ця система супутникового зв’язку направлена на забезпечення глобального, безвідмовного, безпечного, захищеного і завадостійкого зв’язку для високо пріоритетних військових наземних, морських та повітряних засобів. За даними ВПС США, АЕНФ дозволяє Раді національної безпеки і Об’єднаному бойовому командуванню УСС (Unified Combatant Commanders) контролювати свої тактичні та стратегічні сили на всіх рівнях конфлікту у випадку загальної ядерної війни.

Таблиця 1.2

| Смуга частот   |     | Діапазон частот   | Режим розповсюдження   |
|--|-----|-------------------|--|
| Наднизькі частоти<br>(Extremely Low Frequency)           | ELF | Нижче 3 кГц       | Поверхневі хвилі   |
| Низькі частоти<br>(Very Low Frequency)                   | VLF | 3–30 кГц          | З поверхні землі в іоносферу   |
| Низькі частоти<br>(Low Frequency)                        | LF  | 30–300 кГц        | Поверхневі хвилі   |
| Середні частоти<br>(Medium Frequency)                    | MF  | 300 кГц–<br>3 МГц | Поверхневі/іоносферні хвилі на коротких/довгих відстанях   |
| Високі частоти<br>(High Frequency)                       | HF  | 3–30 МГц          | Іоносферні хвилі, проте на досить коротких відстанях – поверхневі хвилі  |
| Дуже високі частоти<br>(Very High Frequency)             | VHF | 30–300 МГц        | Хвилі супутникового зв’язку  |
| Ультрависокі частоти<br>(Ultra High Frequency)           | UHF | 300 МГц–<br>3 ГГц | Хвилі супутникового зв’язку  |
| Надвисокі частоти<br>(Super High Frequency)              | SHF | 3–30 ГГц          | Хвилі супутникового зв’язку. Основні режими мікрохвильового діапазону. Розповсюдження по лінії прямої видимості. Наземні та супутникові лінії зв’язку ретрансляторів |
| Надзвичайно високі частоти<br>(Extremely High Frequency) | EHF | 30–300 ГГц        | Хвилі супутникового зв’язку Розповсюдження по лінії зв’язку прямої видимості. Лінії зв’язку “космос-космос”  |

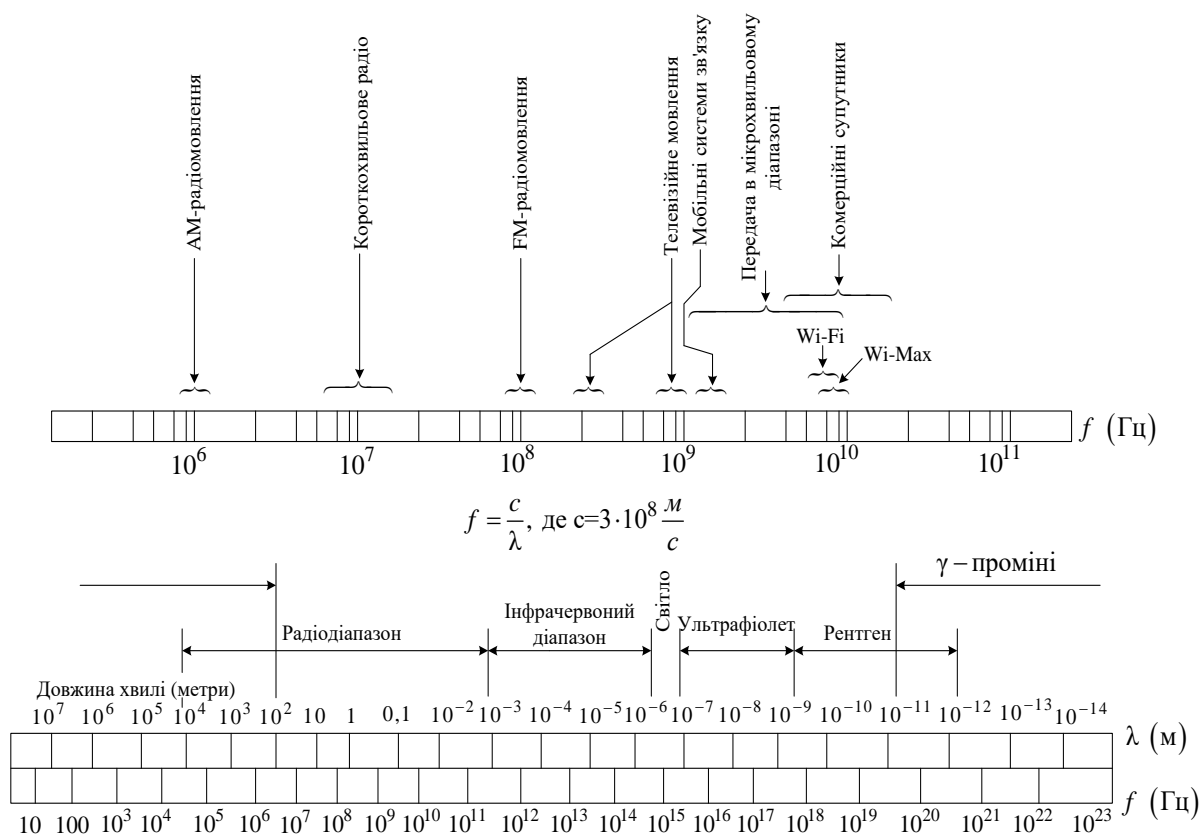


Рисунок 1.4 – Радіочастотні діапазони в межах загального електромагнітного поля

Таблиця 1.3

| ЧАСТОТИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ (ГГц) |                                  |                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Діапазон                            | Лінія зв'язку "вниз"             | Лінія зв'язку "вгору"            |
| C                                   | 3,700–4,200                      | 5,925–6,425                      |
| X (військові)                       | 7,250–7,745                      | 7,900–8,395                      |
| Ku<br>(Europe)                      | 10,7–11,7<br>12,5–12,7 (Telecom) | 14,0–14,8<br>14,0–14,8 (Telecom) |
| DBS<br>(Europe)                     | 11,7–12,5                        | 17,3–18,1                        |
| Ka                                  | 17,7–18,8                        | 27,5–28,6                        |
|                                     | 19,7–20,2                        | 29,5–30                          |
| V                                   | 40–75                            |                                  |

Міжнародний набір смуг надвисоких частот виглядає наступним чином: L-діапазон (0,5–1,5 ГГц); S-діапазон (1,5–2,5 ГГц); C-діапазон (4–8 ГГц); X-діапазон (5,20–10,9 ГГц); K-діапазон (10–40 ГГц).

Фактичні робочі частоти комерційних супутників США:

С-діапазон: 3,7–4,2 ГГц для частот лінії зв'язку “вниз” і 5,925–6,425 ГГц для частот лінії зв'язку “вгору”;

Ku-діапазон: 11,7–12,2 ГГц для частот лінії зв'язку “вниз” і 14,0–14,5 ГГц для частот лінії зв'язку “вгору”;

DBS-діапазон: 12,2–12,7 ГГц для частот лінії зв'язку “вниз” і 17,3–17,8 ГГц для частот лінії зв'язку “вгору”;

Ka-діапазон: 17,7–18,8 ГГц і 19,7–20,2 ГГц для частот лінії зв'язку “вниз”, а також між 27,5–28,6 ГГц і 29,5–30 ГГц для частот лінії зв'язку “вгору” (деякі додаткові послуги на більш високих частотах до 40 ГГц).

Деякі ключові фізичні параметри, що мають відношення до супутникового зв'язку відображені в табл. 1.4. В табл. 1.5 відображено діапазони супутникового зв'язку за стандартом IEEE 521-1984.

Слід відмітити, що Міжнародний союз електрозв'язку ITU (International Telecommunication Union) розділив світ на три регіони (рис. 1.5):

Регіон 1: Європа, Близький Схід, Росія і Африка;

Регіон 2: Північна і Південна Америка;

Регіон 3: Азія, Австралія і Океанія.

Таблиця 1.4

|                  |   |
|------------------|---|
| Частота          | Кількість повторень електричного або електромагнітного сигналу на протязі певного проміжку часу. Частота вимірюється в герцах (Гц) (циклів в секунду). Частоти супутникового зв'язку знаходяться в ГГц діапазоні. |
| Герц (Гц)        | Одиниця вимірювання частоти в системі СІ, еквівалентна одному циклу в секунду. Частота періодичного явища має період повторення 1 с.  |
| Смуга частот     | Діапазон частот, що використовується для передачі або прийому радіохвиль (наприклад, 3,7–4,2 ГГц)   |
| Частотний спектр | Неперервний діапазон частот   |
| Кельвін (К)      | Одиниця вимірювання термодинамічної температури в СІ  |
| Мегасимвол/с     | Одиниця вимірювання швидкості передачі для радіозв'язку, що дорівнює 1000 000 символів/с. Фактично пропускна здатність каналу зв'язку з заданою схемою маніпуляції.   |
| Символ           | Унікальний стан сигналу схеми маніпуляції, що використовується на лінії передачі та кодує один або декілька бітів інформації для приймача.  |
| Ватт (Вт)        | Одиниця вимірювання потужності, що дорівнює 1 Дж/с.   |

SI – System International d'Unites (Міжнародна система одиниць).

Таблиця 1.5

| Позначення діапазону | Частота (ГГц) | Довжина хвилі в космосі (см) |
|----------------------|---------------|------------------------------|
| L-діапазон           | 1–2           | 30,0–15,0                    |
| S- діапазон          | 2–4           | 15–7,5                       |
| C- діапазон          | 4–8           | 7,5–3,8                      |
| X- діапазон          | 8–12          | 3,8–2,5                      |
| Ku- діапазон         | 12–18         | 2,5–1,7                      |
| K- діапазон          | 18–27         | 1,7–1,1                      |
| Ka- діапазон         | 27–40         | 1,1–0,75                     |
| V- діапазон          | 40–75         | 0,75–0,40                    |
| W- діапазон          | 75–110        | 0,40–0,27                    |

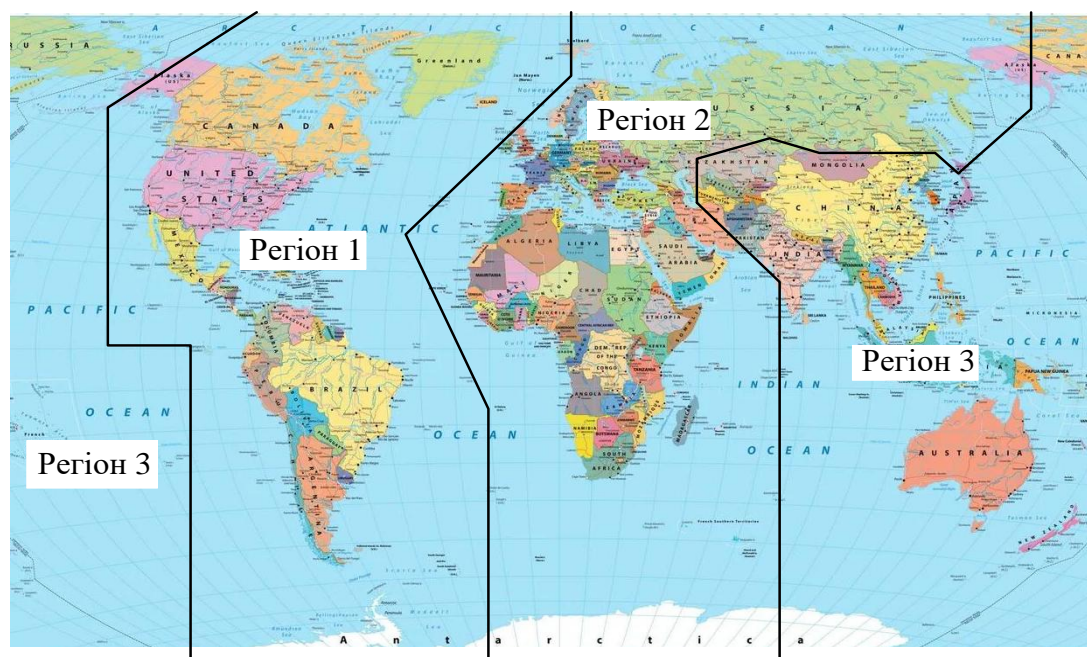


Рисунок 1.5 – Регіони розподілу частот згідно рекомендацій Міжнародного союзу електров'язку

На рис. 1.6 зображено деяку додаткову інформації про смуги частот.

Таблиця розподілу частот, що міститься в статті 5 Регламенту радіозв'язку RP (Radio Regulations), визначає смуги частот службам радіозв'язку в кожному з трьох регіонів ІТУ на основі різних категорій



послуг. Є деякі відмінності в різних країнах; проте С- і Ku-діапазони, як правило, з'їставні.

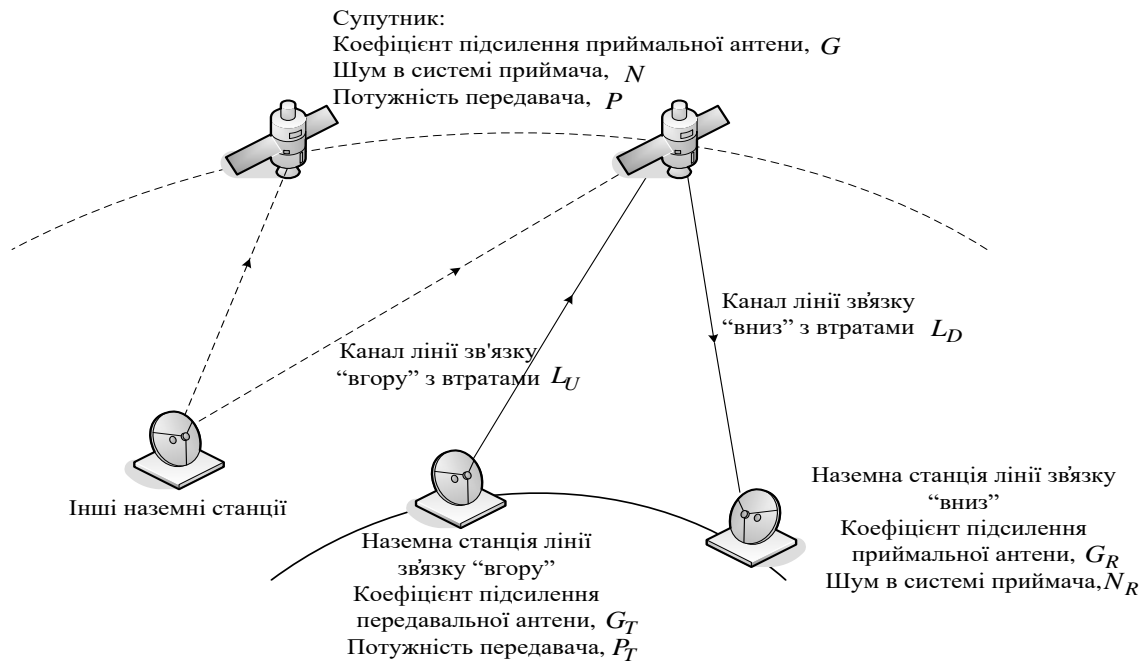


Рисунок 1.6 – Фактори і діапазони супутникової передачі

Смуги частот поділяються на більш менші канали, які можуть працювати незалежно один від одного при використанні для різних застосувань. На рис. 1.7 зображено типове розбиття С- та Ku-діапазону на ці канали, які також називають "транспондери" (табл. 1.6). Номінальна смуга пропускання підканалу (звичайно) складає 40 МГц з корисною шириною смуги 36 МГц. Аналогічний розподіл частот був встановлений для Ка-діапазону. Багато супутників одночасно підтримують інфраструктури діапазонів С і Ku (вони мають спеціальні канали і ретранслятори для кожного діапазону). Більшість систем зв'язку відносяться до однієї з трьох категорій, а саме ефективне використання ширини смуги пропускання, потужність передавача та витрати енергії. Ефективне використання ширини смуги пропускання характеризує здатність схеми маніпуляції розміщувати дані в межах обмеженої ширини смуги частот. Ефективне використання потужності характеризує здатність системи надійно передавати інформацію з заданою величиною достовірності (допустимою кількістю помилок на один біт інформації) на самому низькому практичному рівні потужності. В супутниковому зв'язку

всі показники – ефективність використання смуги пропускання, ККД і потужність радіопередавального пристрою – є досить важливими [6].

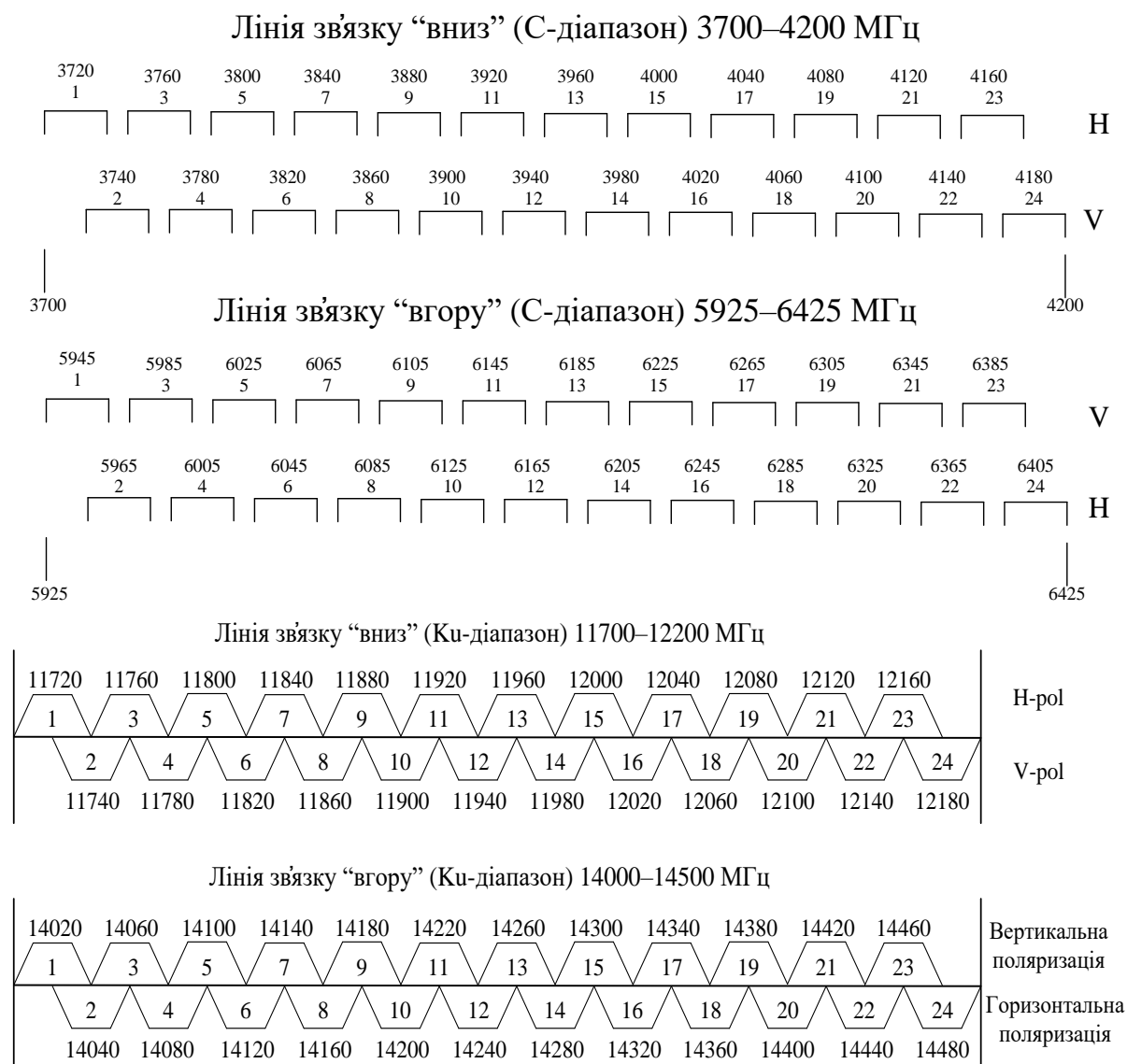


Рисунок 1.7 – Типове розбиття С- та Ku-діапазону на “транспондери”

Супутники зазвичай підтримують декілька промінів, досить типовим є використання від шести до дванадцяти промінів. Це дозволяє використовувати однакові частоти одночасно в різних променях. Ці промені реалізуються з використанням різних антен або окремих каналів на одній антені. Кожний точковий промінь багатократно використовує наявні частоти (або поляризацію), тому один супутник може забезпечити підвищену пропускну здатність. В областях частот, що не перекриваються частоти можуть бути повністю повторними; в областях частот, що



перекриваються повинні бути використані частоти, що не конфліктують. HTS підтримує до 100 промінів в географічних районах, що не перекриваються, тим самим значно збільшуючи загальну корисну пропускну здатність.

Таблиця 1.6

| К-ть ретранс-ляторів | Центральна частота лінії зв'язку "вгору" | Найнижча частота лінії зв'язку "вгору" | Найвища частота лінії зв'язку "вгору" | Центральна частота лінії зв'язку "вниз" | Найнижча частота лінії зв'язку "вниз" | Найвища частота лінії зв'язку "вниз" | Поляризація   |
|----------------------|--|--|---------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
|                      | МГц                                      |  |                                       |   |                                       |                                      |               |
| 1                    | 5945                                     | 5925                                   | 5965                                  | 3720                                    | 3700                                  | 3740                                 | Вертикальна   |
| 2                    | 5965                                     | 5945                                   | 5985                                  | 3740                                    | 3720                                  | 3760                                 | Горизонтальна |
| 3                    | 5985                                     | 5965                                   | 6005                                  | 3760                                    | 3740                                  | 3780                                 | Вертикальна   |
| 4                    | 6005                                     | 5985                                   | 6025                                  | 3780                                    | 3760                                  | 3800                                 | Горизонтальна |
| 5                    | 6025                                     | 6005                                   | 6045                                  | 3800                                    | 3780                                  | 3820                                 | Вертикальна   |
| 6                    | 6045                                     | 6025                                   | 6065                                  | 3820                                    | 3800                                  | 3840                                 | Горизонтальна |
| 7                    | 6065                                     | 6045                                   | 6085                                  | 3840                                    | 3820                                  | 3860                                 | Вертикальна   |
| 8                    | 6085                                     | 6065                                   | 6105                                  | 3860                                    | 3840                                  | 3880                                 | Горизонтальна |
| 9                    | 6105                                     | 6085                                   | 6125                                  | 3880                                    | 3860                                  | 3900                                 | Вертикальна   |
| 10                   | 6125                                     | 6105                                   | 6145                                  | 3900                                    | 3880                                  | 3920                                 | Горизонтальна |
| 11                   | 6145                                     | 6125                                   | 6165                                  | 3920                                    | 3900                                  | 3940                                 | Вертикальна   |
| 12                   | 6165                                     | 6145                                   | 6185                                  | 3940                                    | 3920                                  | 3960                                 | Горизонтальна |
| 13                   | 6185                                     | 6165                                   | 6205                                  | 3960                                    | 3940                                  | 3980                                 | Вертикальна   |
| 14                   | 6205                                     | 6185                                   | 6225                                  | 3980                                    | 3960                                  | 4000                                 | Горизонтальна |
| 15                   | 6225                                     | 6205                                   | 6245                                  | 4000                                    | 3980                                  | 4020                                 | Вертикальна   |
| 16                   | 6245                                     | 6225                                   | 6265                                  | 4020                                    | 4000                                  | 4040                                 | Горизонтальна |
| 17                   | 6265                                     | 6245                                   | 6285                                  | 4040                                    | 4020                                  | 4060                                 | Вертикальна   |
| 18                   | 6285                                     | 6265                                   | 6305                                  | 4060                                    | 4040                                  | 4080                                 | Горизонтальна |
| 19                   | 6305                                     | 6285                                   | 6325                                  | 4080                                    | 4060                                  | 4100                                 | Вертикальна   |
| 20                   | 6325                                     | 6305                                   | 6345                                  | 4100                                    | 4080                                  | 4120                                 | Горизонтальна |
| 21                   | 6345                                     | 6325                                   | 6365                                  | 4120                                    | 4100                                  | 4140                                 | Вертикальна   |
| 22                   | 6365                                     | 6345                                   | 6385                                  | 4140                                    | 4120                                  | 4160                                 | Горизонтальна |
| 23                   | 6385                                     | 6365                                   | 6405                                  | 4160                                    | 4140                                  | 4180                                 | Вертикальна   |
| 24                   | 6405                                     | 6385                                   | 6425                                  | 4180                                    | 4160                                  | 4200                                 | Горизонтальна |

На рис. 1.8 зображена двостороння супутникова лінія зв'язку. Наскрізне з'єднання (від віддаленої точки до центральної) використовує радіоканал, як було описано вище, зі сторони лінії зв'язку "вгору" сигнал йде від передавальної наземної станції до супутника; крім того по лінії зв'язку "вниз" радіоканал працює на приймальну наземну станцію (його зазвичай також називають вхідний зв'язок). Вихідний зв'язок – від

центральної точки до віддаленої – також використовує радіоканал, який містить лінію зв'язку “вгору” та “вниз”.

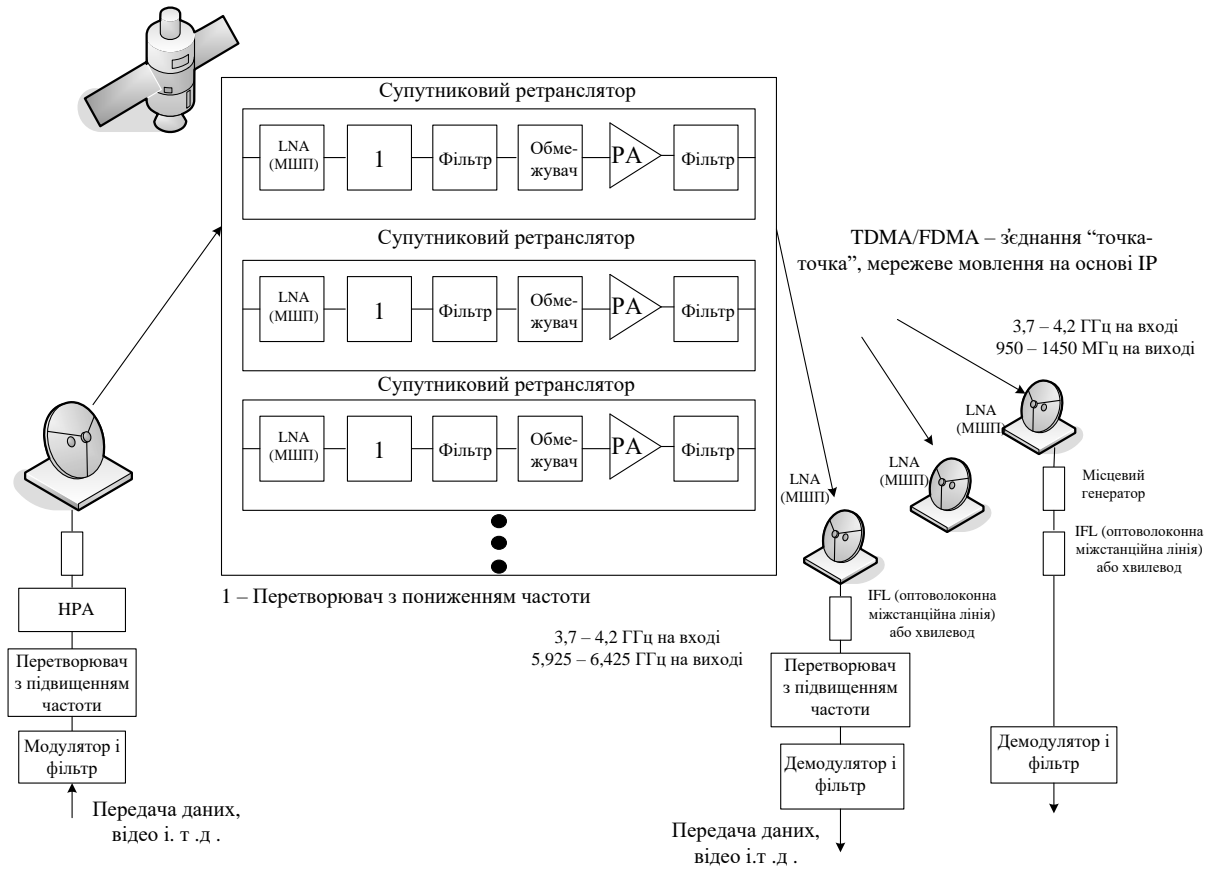


Рисунок 1.8 – Двостороння супутникова лінія зв'язку

Супутниковий зв'язок може мати тип “точка-точка” (ефективно, коли обидві кінцеві точки лінії є рівноправними) або це може бути зв'язок типу “точка-агрегація точок”, наприклад для передачі обслуговування корпоративної мережі або мережі Інтернет. Деякі прикладні програми – симплексні, як правило, використовують вихідний зв'язок; інші прикладні програми є дуплексними, використовують як вхідний так і вихідний зв'язок.

В даний час в супутниковому зв'язку виключно використовується цифрова маніпуляція. Маніпуляція – це процес зміни в часі за заданим законом параметрів (характеристик) якогось з регуляторних фізичних процесів. Практичне значення має маніпуляція коливань – накладання низькочастотного інформаційного сигналу на високочастотний сигнал-носії для передавання на великі відстані. Детектування (Detection, Rectification) – перетворення високочастотних маніпульованих (наприклад,

за частотою) коливань для виділення низькочастотного сигналу; є процесом, зворотним до маніпуляції коливань, і складовою частиною радіоприйому. На базову аналогову несучу частоту накладається цифровий сигнал, як правило, з використанням методів 4-х або 8-ми точкової фазової маніпуляції PSK (Phase Shift Keying), QPSK або 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Крім того, вихідний сигнал досить часто йде в зашифрованому вигляді та незмінно захищений методами прямої корекції помилок FEC (Forward Error Correction).

Як вже зазначалось, для лінії зв'язку “вгору” та “вниз” використовуються різні частоти, щоб уникнути власних завад, слідуючи архітектурі наземної мікрохвильової передачі, що розроблена Bell System в 1940-х і 1950-х роках. Основні параметри систем, що працюють в С-діапазоні: 4 ГГц в лінії зв'язку “вниз”, 6 ГГц в лінії зв'язку “вгору”, смуга пропускання 500 МГц для 24 ретрансляторів з використанням вертикальної та горизонтальної поляризації сигналу несучої радіочастоти, в результаті чого пропускна спроможність ретрансляторів складає 36 МГц (45–75 Мбіт/с) або більш корисної пропускної здатності – в залежності від виду маніпуляції та схеми FEC. С-діапазон використовувався на протязі декількох десятиліть та має хороші характеристики передачі, особливо під час дощу, який зазвичай погіршує передачу на високих частотах. Як правило, зв'язок в С-діапазоні використовується для передачі телевізійних сигналів і серед іншого для військових завдань.

В супутниковому зв'язку використовуються декілька різних типів антен, проте найбільш часто використовуються параболічні дзеркальні антени з вузьким променем ДС. Параболічні антени, що працюють в С-діапазоні для прийому високої якості відео, як правило, мають 3,8–4,5 м в діаметрі. Розмір вибраний для оптимізації прийому при хорошій погоді (чисте небо); тим не менш, можна також використовувати антени менших розмірів – 1,5–2,4 м в залежності від запропонованого застосування, а також супутникового покриття. При двосторонній передачі також використовуються антени того ж розміру і конструкції (хоча більшість антен можуть застосовуватися в деяких додатках, особливо на великій наземній станції). Доступність, прийнятна частота появи помилкових бітів, потужність випромінювання радіопередавача, розміщеного на супутнику, а також запобігання ослабленню сигналу внаслідок впливу дощових опадів визначає конструкцію/розмір антени та потужність передавача наземної станції.

Корпоративні прикладні програми, як правило, використовують Ku- діапазон із-за того, що в даному випадку можна встановлювати антени меншого розміру, як правило, 0,6–2,4 м (в залежності від застосування, зони дощових опадів і пропускну здатності). Більш нові прикладні програми використовуються, як правило, для розповсюдження відео за допомогою прямого супутникового мовлення DBS/провайдерми комерційного супутникового телемовлення. Пряма трансляція відео DTH (Direct to Home) шукає можливість використовувати Ka- діапазон, де розмір антени може складати від 0,3 до 1,2 м (табл. 1.7). В деяких додатках застосовуються методи з розширенням спектру і інші види цифрової обробки сигналу для зменшення розміру антени шляхом зменшення рівня поза смугових випромінювань (або в лінії зв'язку “вгору”, наприклад, з розширенням спектра, або в лінії зв'язку “вниз” з відмінною цифровою обробкою супутникового сигналу).

Таблиця 1.7

| Частота (ГГц) | Довжина хвилі (м) | Типовий розмір антени (м) |
|---------------|-------------------|---------------------------|
| 3,7           | 0,081081081       | 1,2–4,8                   |
| 4,2           | 0,071428571       |                           |
| 5,925         | 0,050632911       |                           |
| 6,425         | 0,046692607       |                           |
| 11,7          | 0,025641026       | 0,6–2,4                   |
| 12,2          | 0,024590164       |                           |
| 12,7          | 0,023622047       |                           |
| 18,3          | 0,016393443       | 0,3–1,2                   |
| 18,8          | 0,015957447       |                           |
| 19,7          | 0,015228426       |                           |
| 20,2          | 0,014851485       |                           |
| 27,5          | 0,010909091       |                           |

У зв'язку з вже згаданою проблемою ефективного використання геостаціонарної навколоземної орбіти розміщують декілька супутників на геостаціонарній орбіті: зазвичай на кожних  $2^0$  дуги і навіть зміщених в одній позиції, коли існує необхідність використовувати різні робочі частоти. В супутникових системах можна ефективно застосовувати одночасне міжсупутникове використання однакових частот за допомогою

мультиплексування з розділенням в просторі; це означає, що якщо встановлені високо направлені антени, то велика кількість супутників (навіть сусідні) можуть використовувати однакові смуги робочих частот. Деякі прикладні програми (наприклад, пряма трансляція користувачам) або деякі юрисдикції (за межами США) допускають інтервал в  $3^0$ ; більш високе розділення знижує технічні вимоги до антенної системи, проте призводить до зменшення кількості супутників в космосі. Супутники DBS зазвичай знаходяться на відстані  $9^0$  орбітальної дуги один від одного.

Якщо система буде налаштована неправильно, із дотриманням всіх застосованих положень і технічних керівних принципів, можуть з'явитися завади від сусідніх супутників. Передавальна наземна станція може ненавмисно направити частину своєї потужності випромінювання супутникам, які працюють на орбітальних позиціях, що розташовані близько до положення необхідного супутника. Це може виникати тому, що передавальна антена неправильно направлена на необхідний супутник, або тому, що промінь антени наземної станції не в достатній мірі сконцентрований в напрямку цього супутника (наприклад, антена досить мала). Таке ненавмисне випромінювання може заважати службам, які використовують таку ж частоту на сусідніх супутниках. Завади в сусідніх супутникових системах контролюються до прийняттого рівня, гарантуючи, що ДС передавальної антени наземної станції точно направлена на супутник, і що його продуктивність (схема випромінювання) є достатньою для подавлення випромінювання в напрямку сусідніх супутників. В цілому, велика антена на лінії зв'язку "вгору" буде мати менший потенціал для створення завад у сусідніх супутниках, проте вона коштує дорожче, також в доповнення до неї може знадобитися установка системи слідкування за супутниками. Аналогічним чином приймаюча наземна станція може ненавмисно приймати передачу сигналу від сусідніх супутникових систем, які внаслідок цього заважають прийому корисного сигналу. Це виникає тому, що приймальна антена є досить чутливою до сигналів, що надходять з напрямку корисного супутника, за рахунок бокових пелюстків вона також чутлива до передач від інших напрямків. По відношенню до наземної станції досить важливим також є її направлення в сторону супутника, щоб мінімізувати ефекти завад сусідніх супутників [7].

Методи розширення спектра та інші методи цифрової обробки сигналів використовуються в деяких сучасних додатках, щоб зменшити

кількість небажаних сигналів. Поштовх розвитку індустрії в цьому напрямку дало додавання ідентифікаційного номера сигналу модемом, який називається ID- несучою. ID- несуча дозволяє визначити джерело передачі і, таким чином, дає можливість краще підготуватися до корекції будь-якого складного сигналу, що приймається супутником. Розподіл каналу (транспондер) досягається на даному етапі шляхом множинного доступу з часовим розподілом каналів TDMA (Time Division Multiple Access), методами випадкового доступу, множинним доступом за вимогою DAMA (Demand Access Multiple Access) або множинним доступом з кодовим розділенням CDMA (Code Division Multiple Access) (розширений спектр). Все частіше передача інформації здійснюється на основі IP-протоколу (голос, відео, данні).

#### 1.4 Відновлення супутникового сигналу

В загальному випадку функція передачі інформації тягне за собою передачу бітів по каналу зв'язку. Оскільки в системі зв'язку для передачі застосовуються множина середовищ, багато з методів передачі є специфічними для самого зручного середовища.

Типовими проблемами передачі даних є:

- ✓ послаблення сигналу (наприклад, втрати потужності у просторі або ослаблення при дощових опадах);
- ✓ розсіювання сигналу;
- ✓ нелінійність сигналу (наприклад, із-за явищ при підсиленні сигналу або його розповсюдженні);
- ✓ внутрішній або зовнішній шум;
- ✓ перехресні завади (наприклад, високий рівень поза смугових випромінювань), між символні завади і інтермодуляція;
- ✓ зовнішні завади та завади від сусідніх супутників.

Як правило, деякі з цих спотворень сигналу, проте не всі, можуть бути вирішені за допомогою пристрою для відновлення сигналу на

фізичному рівні. Методи відновлення сигналу на фізичному рівні є специфічними для середовища (наприклад, радіоканал, оптоволоконний канал, канал з мідної витой пари і. т. д.) Відновлення сигналу на фізичному рівні коректує послаблення сигналу, його розсіювання та перехресні завади; це робиться за допомогою повторного підсилення сигналу, повторної синхронізації і відновлення форми. Відновлення сигналу, як правило, вважається функцією рівня один в еталонній моделі взаємодії відкритих систем OSIRM (Open Systems Interconnection Reference Model).

Пристрій для відновлення сигналу на нижньому фізичному рівні включає в себе тільки функцію повторного підсилення. Такі пристрої відомі як 1R регенератори. Пристрої для відновлення сигналу на “високому рівні” виконують повторне підсилення, відновлення синхронізації, форми і функціональності. Вони відомі як 3R регенератори на фізичному рівні.

Основні функції 3R регенератора:

- ✓ повторне підсилення: підвищує рівні потужності вище чутливості системи;
- ✓ повторна синхронізація: придушує стрибки фази відновленням за допомогою оптичних годинників;
- ✓ відновлення форми сигналу: придушує шум і амплітуду коливань на етапі прийняття рішення.

Архітектура супутникового пристрою відновлення сигналу – ретранслятора зображена на рис. 1.9.

## **1.5 Передавальна мережа супутникового зв’язку**

Наземний сегмент передавальної мережі супутникового зв’язку складається із станції на поверхні Землі (наземна станція), які працюють в межах конкретної супутникової системи або мережі. Наземні станції зазвичай підключені до обладнання кінцевого користувача за допомогою місцевої кабельної мережі. Наземний сегмент виконує одну або дві наступні дії: (I) зв’язок по лінії зв’язку “вгору”, (II) зв’язок по лінії зв’язку “вниз”.



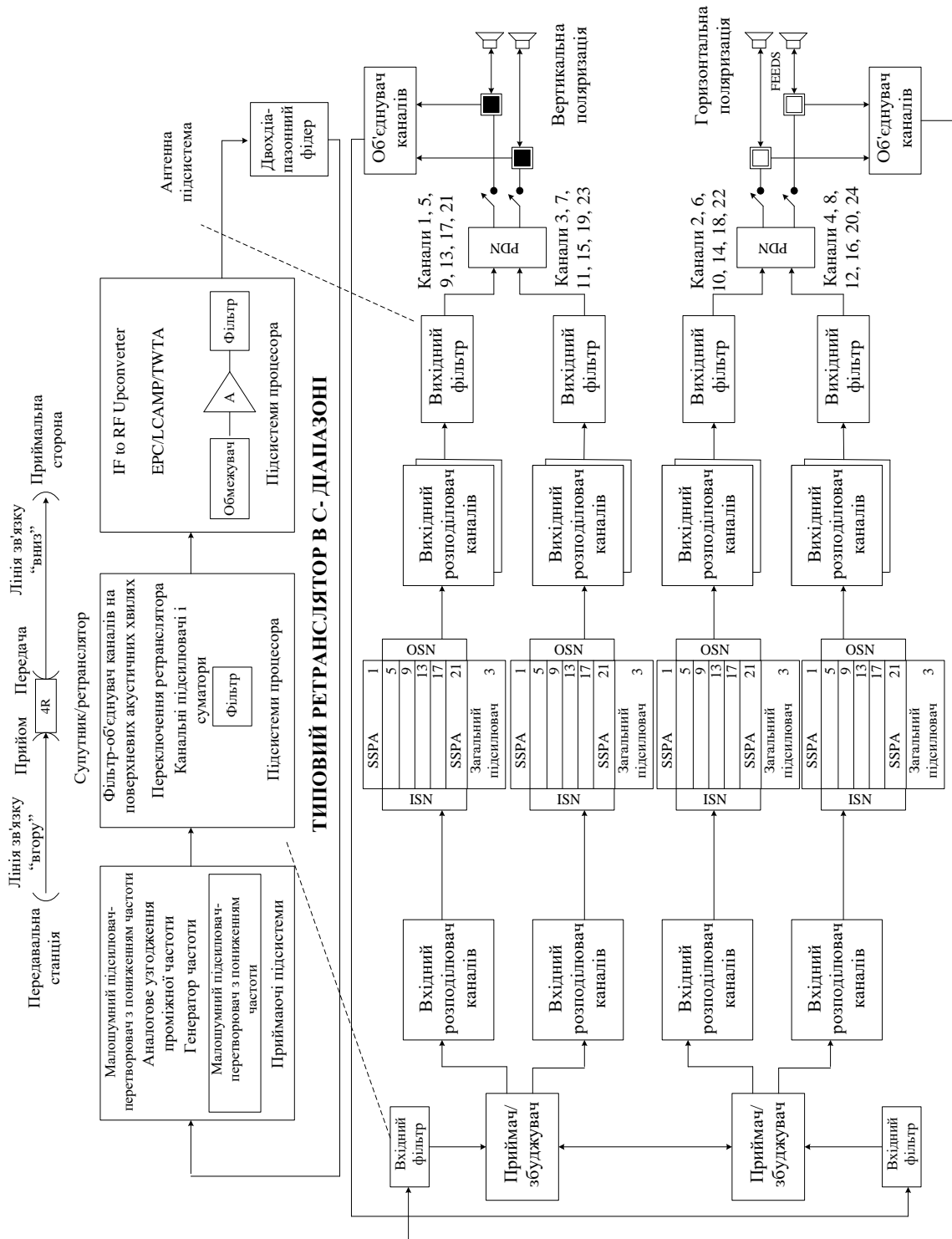


Рисунок 1.9 – Архітектура супутникового ретранслятора

Лінією зв'язку “вгору” є та частина лінії супутникового зв'язку, яка здійснює передачу сигналу від наземної станції до його прийому на борту супутника. Лінія зв'язку “вниз” – частина лінії супутникового зв'язку, яка здійснює ретрансляцію сигналу з супутника та прийом його на місцях наземною станцією.

Лінія супутникового зв'язку включає в себе наступні елементи:

- ✓ обладнання для маніпуляції;
- ✓ обладнання для перетворення сигналу з підвищенням частоти;
- ✓ обладнання для підсилення сигналу, що передається;
- ✓ канал передачі по лінії зв'язку “вгору”;
- ✓ обладнання для зсуву частоти (перетворення на супутнику);
- ✓ канал передачі по лінії зв'язку “вниз”;
- ✓ антенне обладнання;
- ✓ обладнання для підсилення прийнятого сигналу;
- ✓ обладнання для перетворення сигналу з пониженням частоти;
- ✓ обладнання для детектування.

Управління сигналом на Землі краще здійснювати на більш низьких частотах, звідси слідує необхідність в перетворенні частоти (з підвищенням для передачі і пониженням при прийомі). Перетворення з пониженням частоти є процес перетворення частоти сигналу на більш низьку частоту, що виконується в точці прийому. Протилежний процес перетворення з підвищенням частоти – це процес перетворення частоти сигналу на більш високу частоту, що відбувається в момент передачі. Транспондер приймає сигнал по лінії зв'язку “вгору” на частоті  $f_1$ , підсилює та передає його на Землю на другій частоті  $f_2$ .

Система лінії зв'язку “вгору” складається з наступних підсистем (часто в режимі резервування):

- ✓ пристрої інтерфейсу мережі (маршрутизатори, шифратори, системи умовного доступу та інкапсулятори);
- ✓ модулятори – пристрої, які накладають амплітуду, частоту або фазу хвилі або сигнал на іншу хвилю – несучу, а вона потім використовується для передачі вихідного сигналу по супутниковому каналу. Зазвичай використовуються режими модуляції QPSK і 8-PSK, проте можуть використовуватися і інші більш складні методи маніпуляції.

✓ блоки з підвищення частоти – це пристрої для перетворення частоти сигналу в більш високу частоту; трансівери приймають сигнал на частоті 70/140/900 МГц і перетворюють її в кінцеву частоту С-, Ku- або Ka-діапазонів;

✓ Підсилювачі потужності передавача забезпечують підсилення сигналу, який повинен передаватися супутнику (зазвичай до 750–3000 Вт), наприклад, підсилювач потужності PA (Power Amplifiers), підсилювач високої потужності HPA (High-Power Amplifiers) або твердотілий підсилювач потужності SSPA (Solid State Power Amplifier).

✓ передавальні антени (найбільш розповсюдженими є параболічні антени), які підсилюють сигнал та формують промінь, величина якого прямо пропорційна квадрату діаметра параболічної антени (тобто, площі антени).

Підсилювач з підвищенням частоти BUC (Block Up Converter) приймає сигнал L-діапазону та перетворює його в кінцеву частоту або частоту С-діапазону, або Ku-діапазону. BUC, як правило, використовується для антен двостороннього зв'язку в комерційних додатках і працює в діапазоні потужності 5–25 Вт.

Система лінії зв'язку “вниз” складається з наступних компонентів:

✓ приймальні антени;

✓ малошумовий підсилювач LNA (Low Noise Amplifier), розміщується на опромінювач приймальної антени (малошумовий підсилювач із пониженням частоти LNBD (Low Noise Block Downconverter));

✓ блоки пониження частоти – це пристрої для перетворення частоти сигналу в більш низьку частоту, прийомо-передавачі, які приймають сигнал з частотою С-, Ku-, або Ka-діапазону і перетворюють його в одну з проміжних частот – 70, 140 або 900 МГц відповідно;

✓ демодулятор для виділення даних з маніпульованого сигналу на проміжній частоті (при двосторонньому зв'язку модулятор і демодулятор, як правило, об'єднані в єдиний модем).

Антени в супутниковому середовищі є відбиваючими системами і, як правило, мають параболічну форму. Високо направлена антена концентрує велику частину енергії, що випромінюється вздовж осьової лінії діаграми направленості антени. Звідси, слідує, що антену з високим коефіцієнтом

підсилення слід направляти з досить високою точністю. При 12 ГГц точність направленості для супутникової тарілки діаметром 1 м повинна бути порядком  $1^0$  або  $2^0$  дуги. Антена використовує трьох осьову систему наведення, яку необхідно відрегулювати при наведенні на супутник (див. рис. 1.10 [8]).

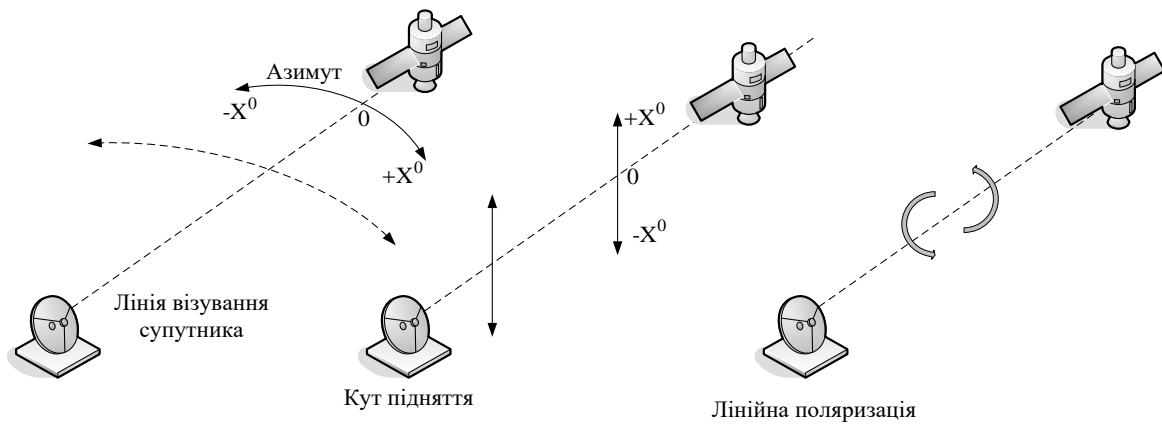


Рисунок 1.10 – Наведення антени наземної станції на супутник

*Азимут* – магнітний напрямок компаса, за яким здійснюється спрямування супутникової антени (регулювання із сторони в сторону). Азимут – кутовий вимір у сферичній системі координат. Нехай  $\epsilon$  вектор, що бере початок від спостерігача (початок координат) до деякої точки, і спроектований перпендикулярно на площину відліку. Магнітний азимут – горизонтальний кут, який відлічується за годинниковою стрілкою від північного напрямку магнітного меридіану до точки спостереження (супутника) заданого напрямку від  $0^0$  до  $360^0$ .

*Кут підняття* – кут підйому над горизонтом, під яким направлена супутникова антена. Це регулювання верх-вниз.

*Поляризація* – (лінійна) поляризація або зсув представляє собою вирівнювання опромінювача, яке необхідне для захоплення максимального сигналу з супутника у відповідності з орієнтацією передачі супутникового сигналу. Це регулювання обертанням. Поляризація запобігає дії завад від сигналів того ж супутника на тій же частоті, проте протилежних за поляризацією.

Вектори електромагнітного поля, що утворюються антеною, певним чином орієнтовані у просторі. Направлення цих векторів визначається

площиною поляризації електромагнітного поля. Лінійно поляризована хвиля характеризується постійною площиною поляризації електричного поля. У хвилі з круговою поляризацією вектор електричного поля  $i$ , відповідно, поляризація обертаються навколо напрямлення розповсюдження. Кутова поляризація є ідеальним випадком, коли модулі значень вертикального та горизонтального векторів є однаковими. Якщо ці значення не співпадають, то говорять про еліптичну поляризацію. Для забезпечення прийому сигналів поляризація (в тому числі напрямок обертання) передавальної та приймальної антени повинні бути однаковими. Якщо передавальна антена має еліптичну поляризацію, а приймальна антена – вертикальну, то прийом сигналів супроводжується втратами в 3 дБ.

Приймальна антена забезпечує ступінь направленості (коефіцієнт підсилення антени) та допомагає виділити необхідний сигнал від інших сигналів та шумів, коли головний пелюсток антени точно направлений в сторону його джерела. У випадку загальної параболічної антени коефіцієнт підсилення прямо пропорційний квадрату діаметра антени.

Малошумовий підсилювач на робочій частоті (РЧ) підсилює сигнал, що надходить від антени та подає його в перетворювач частоти, на виході якого формується сигнал проміжної частоти (ПЧ) 70, 140, 900 МГц. Малошумові підсилювачі зазвичай мають високу точність та стабільність роботи, проте вони і коштують дорожче, ніж малошумові підсилювачі з пониженням частоти, які підсилюють РЧ-сигнал від антени і перетворюють його в сигнал L-діапазона. Малошумовий підсилювач з пониженням частоти забезпечує підсилення на 50–60 дБ, а також перетворює частоти одного блоку в частоти іншого (підсилюючи вхідний сигнал на виході та переносячи його на іншу частоту). Малошумовий підсилювач із пониженням частоти зазвичай використовується в односторонніх польових антенах.

Існує дві технології малошумових підсилювачів із пониженням частоти BDC (Block Down Converter): традиційна технологія на базі генератора з діелектричним резонатором DRO (Dielectric Resonator Oscillator), а більш нова технологія фазове автопідлаштування частоти PLL (Phased Locked Loop). PLL більш стабільна, ніж DRO, оскільки вона використовує більш стабільний опорний кварцовий генератор або вхід із

стабільного зовнішнього джерела (DRO зазвичай мають стабільність  $\pm 100$  кГц або приблизно  $\pm 1000$  кГц). Звідси слідує, що в додатках із низькими швидкостями передачі даних або невеликими частотами (наприклад, 50 кГц в ширину) PLL-перетворювачі зазвичай забезпечують більш високу продуктивність. DRO є прийнятним рішенням, коли сигнал має несучі з великими швидкостями передачі даних (такими, як DVB-S2 або DVB-S2X відеосигнали); побічною перевагою технології DRO є те, що вона більш економічно ефективна, ніж системи PLL. В табл. 1.8 представлена перспектива використання двох технологій малошумових підсилювачів з пониженням частоти у відповідності з передовою практикою. Консенсус полягає в тому, що вибір таких підсилювачів залежить від прикладних програм, як правило, при швидкостях вище 1 Мбіт DRO забезпечує досить прийнятну роботу.

Таблиця 1.8

| Тип генератора для підсилювача з пониженням частоти | Інтервал стабільності частоти    | Застосування  |
|---|----------------------------------|---|
| Внутрішня PLL                                       | Від $\pm 150$ кГц до $\pm 5$ кГц | VSAT збір даних   |
| Зовнішня PLL  | Від 0 до $\pm 1$ кГц             | Вузкосмугова передача даних   |
| DRO   | Від $\pm 1$ кГц до $\pm 150$ кГц | Телевізійне мовлення<br>Широкошмугова передача даних.<br>Широкошмугове мовлення |

На практиці кращі результати показують прикладні програми, що використовують підсилювачі із пониженням частоти і автоматичним підлаштуванням робочої частоти, в той час як інші прикладні програми однаково добре обслуговуються технологією DRO. Зазвичай спостерігаються наступні випадки:

✓ цифрові відеоприкладні програми MPEG-2/4 добре працюють з високо стабільними блоковими підсилювачами-перетворювачами з пониженням частоти і DRO;

✓ системи VSAT і точки продаж POS (Point of Sale) можуть використовувати DRO і BDC, проте більшість користувачів віддають перевагу PLL, щоб забезпечити максимально можливу надійність системи;

✓ рухомі станції збору даних з використанням супутникових систем SNG (Satellite News Gathering) зазвичай використовують підсилювачі з пониженням і автоматичним фазовим підлаштуванням частоти для найбільш надійної роботи в самих складних умовах.

## 1.6 Прикладні програми супутникового зв'язку

Основні комерційні прикладні програми включають в себе:

- ✓ передача відео SD-, HD-, 3D- та UHD-канали;
- ✓ платне супутникове телебачення – SD-, HD-, 3D- та UHD-канали;
- ✓ доставка відеосигналу та періодичне використання OU (Occasional Use) – аналогові та цифрові канали;
- ✓ послуги традиційної телефонії, в тому числі мобільні мережі;
- ✓ корпоративні мережі передачі даних (Enterprise Data);
- ✓ широкопasmовий доступ;
- ✓ мобільний доступ (на морських та повітряних засобах);
- ✓ урядові служби та військові підрозділи;
- ✓ M2M- послуги.

Багато з цих прикладних програм повинні мати підтримку IP- протоколу (наприклад, IPv4):

✓ Двохсторонній корпоративний супутниковий зв'язок підприємств (термінал супутникового зв'язку з досить маленькою апертурою антени – VSAT (Very Small Aperture Terminal) для підключення до мереж Інтранет/Інтернет (див. рис. 1.11, а). Сьогодні IPv4 є широко розповсюдженим протоколом, проте корпоративні клієнти або державні установи в майбутньому можуть використовувати протокол IPv6. Деякі системи VSAT налаштовані в мережі таким чином, що дозволяє віддаленим вузлам взаємодіяти один з одним без необхідності зв'язку через центральний вузол зв'язку, проте для цього зазвичай необхідні великі антени у віддалених місцях.

✓ Передача відео через кабельні головні станції (див. рис. 1.11 б). В майбутньому кабельні телевізійні компанії можуть бути зацікавленими в протоколі IPv6.

✓ Платна супутникова телевізійна трансляція відео користувачам. Деякі додаткові прикладні програми можуть бути в стані забезпечити ефективне використання інфраструктури протоколу IPv6.



✓ Прикладна програма для доступу в Інтернет пасажиром літаків/абонентам мобільного зв'язку (див. рис. 1.12, а) і прикладна програма M2M (див. рис. 1.12, б). Протокол IPv6 є ідеальною базовою інфраструктурою для всеохоплюючого Інтернету речей IoT (Internet of Things) і мобільних прикладних програм.

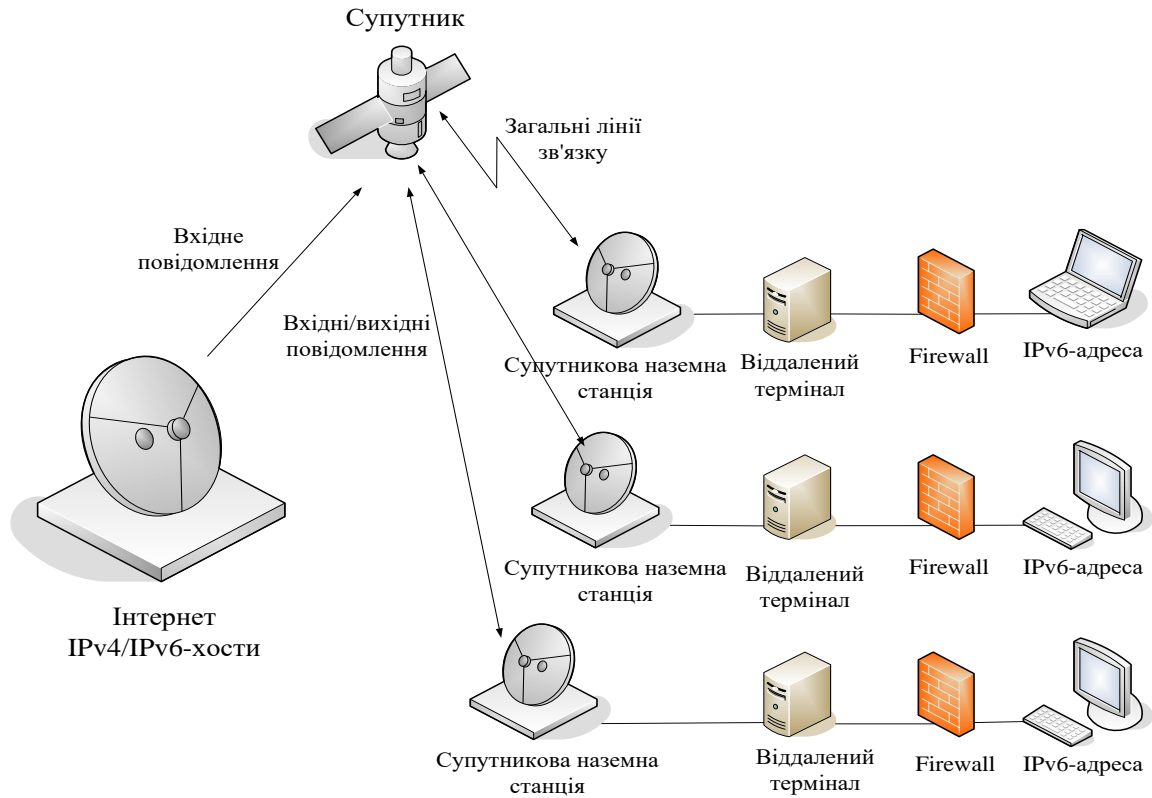


Рисунок 1.11 а – Корпоративний двохсторонній (VSAT) супутниковий зв'язок

Прискорення роботи прикладних програм, як правило, необхідне для рішення проблеми односторонньої затримки розповсюдження сигналу, яка складає приблизно 250 мс для супутника фіксованої супутникової служби зв'язку. VSAT-системи зазвичай використовують ряд методів для покращення зв'язку між кінцевими користувачами. Підвищення

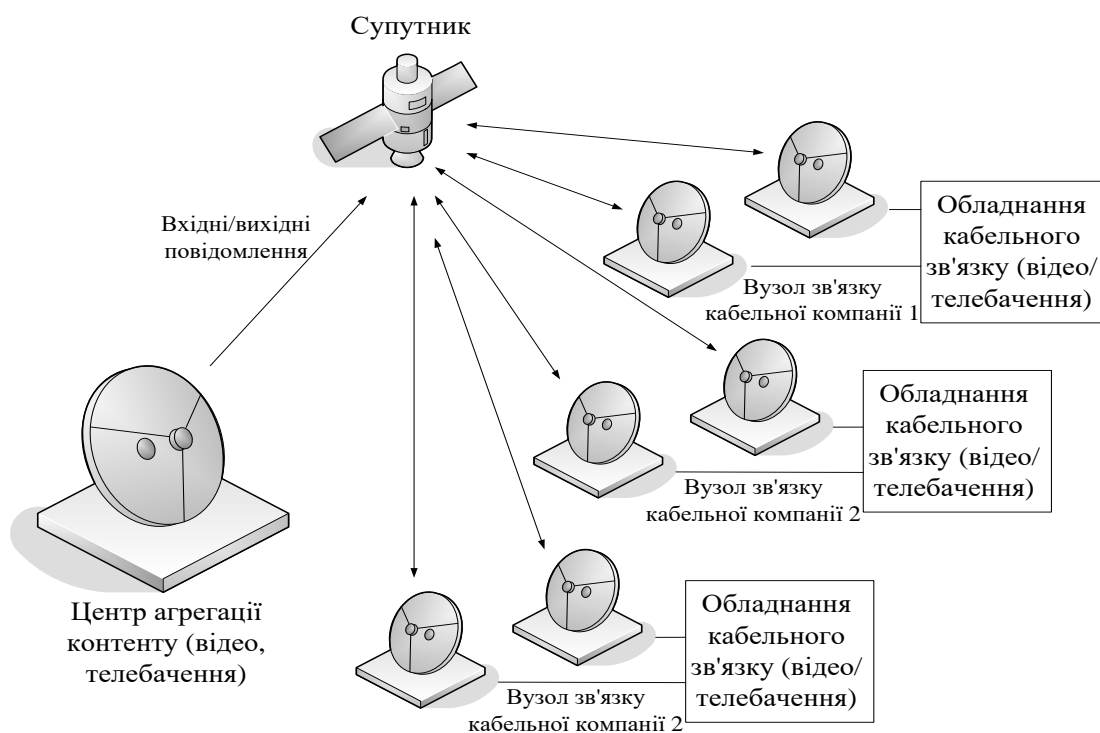


Рисунок 1.11 б – Розповсюдження супутникового відео по Cable Headend

продуктивності проксі-сервера PEP (Performance Enhancing Proxy), що визначене в IETF RFC 3135, передбачає механізми скорочення бітів номера підтвердження ACK (Acknowledgment Number) протоколу TCP і трьох етапне погодження зв'язку. Методи RFC 3095 можуть бути використані для стискування заголовку. Також використовується прискорення зв'язку на рівні прикладних програм. Наприклад, в прикладних програмах для веб-серфінгу користувачу необхідно чекати повільне “завантаження” сторінки, оскільки веб-об'єкти вибираються один за одним. Для вирішення даної проблеми наземні системи VSAT реалізували протокол передачі гіпертексту HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) для здійснення вибору об'єкту. Мета полягає в тому, щоб зменшити надмірність протоколу, що залучений до вибору об'єктів, які є складовими веб-сторінки. Дана функція реалізована в техніці супутникового зв'язку Hughes [9].

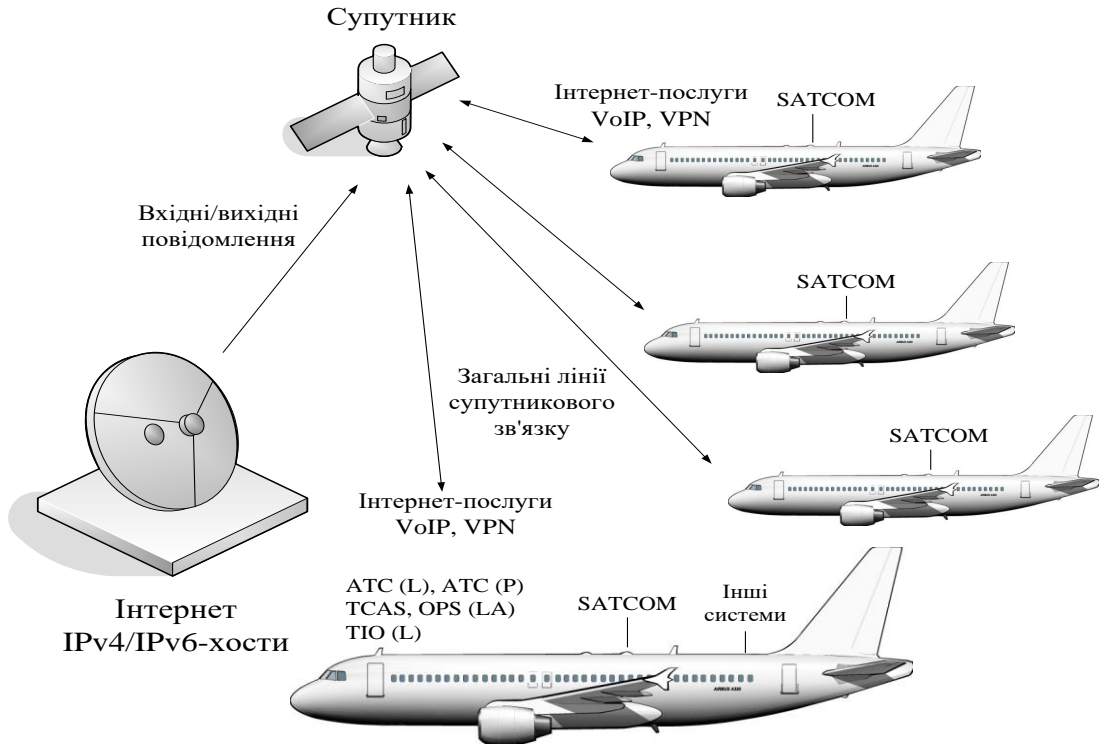


Рисунок 1.12 а – Типові прикладні програми для пасажирів літаків і абонентів мобільного зв'язку

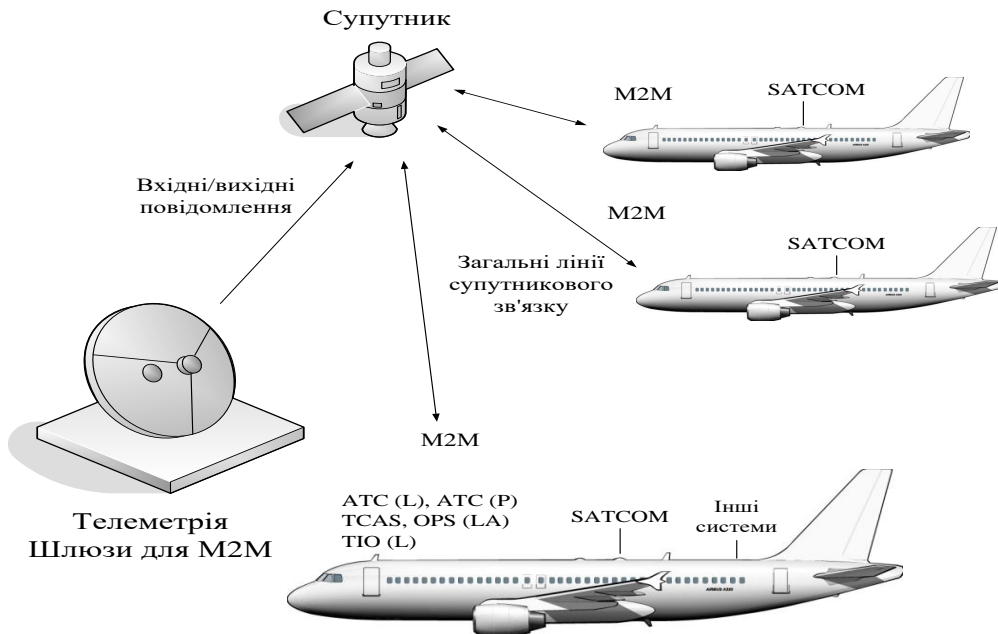


Рисунок 1.12 б – Прикладна програма M2M для пасажирів літаків і абонентів

## Питання для самоконтролю до розділу 1

1. Дати визначення супутниковому зв'язку.
2. Привести класифікацію супутникових послуг.
3. Назвіть супутникові орбіти, що знаходяться в загальному користуванні.
4. Назвіть відомі провайдери супутникового зв'язку в Україні.
5. З яких сегментів складається система супутникового зв'язку. Приведіть їх основні характеристики.
6. Назвіть відомі провайдери супутникового зв'язку в Україні.
7. Поясніть загальну структуру системи супутникового зв'язку.
8. Що утворює космічний сегмент системи?
9. Які основні характеристики супутників зв'язку?
10. Який діапазон частоти супутникового зв'язку для визначення місця знаходження?
11. Який діапазон частоти супутникового зв'язку для мобільного зв'язку?
12. Який діапазон частоти супутникового зв'язку для військового застосування?
13. Які використовуються протоколи для супутникових систем?
14. Які використовуються методи кодування сигналів?
15. Назвіть складові наземного сегменту супутникового зв'язку.
16. Які функції виконує шлюзова станція?

### СТАНДАРТ СУПУТНИКОВОГО ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-S2

#### 2.1 Загальна характеристика стандарту DVB-S2

Стандарт другого покоління DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - Standard2) задовольняє вимогам основних супутникових прикладних програм мовлення: стандартне SDTV (Standard Digital Television) та високоякісне телевізійне мовлення HDTV (High Digital Television); доступ до Інтернету; доставка телевізійних програм до наземних передавачів та інше.

Основні переваги стандарту DVB-S2 перед DVB-S є:

- ✓ збільшення на 30% пропускної здатності (для користувачів супутникового Інтернету, що в свою чергу призвело до зменшення тарифів, покращення якості зображення, збільшення кількості телевізійних каналів);

- ✓ висока гнучкість (система супутникового телебачення залишається працездатною при будь-яких параметрах нині діючих транспондерів, що надають вибір сигналів з різною спектральною ефективністю);

- ✓ здатність до передачі будь-якого формату вхідного цифрового потоку, включаючи один або декілька транспортних потоків MPEG (Moving Picture Experts Group), неперервні бітові потоки, пакети IP (Internet Protocol) і ATM (Asynchronous Transfer Mode).

- ✓ більш висока стабільність і завадостійкість.

В цьому стандарті застосовані останні розробки в області каналного кодування в поєднанні з більш широким вибором видів маніпуляції сигналів (QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 8PSK (Phase-Shift Keying), 16APSK (Amplitude and Phase-Shift Keying) і 32APSK), що дозволяє збільшити швидкість передачі при збереженні необхідного високого рівня захисту від помилок [10–13].

В залежності від вибраної швидкості коду і типу маніпуляції система здатна працювати при співвідношенні несучої частоти до шуму SNR (Signal-to-Noise Ratio) від  $-2,4$  дБ (QPSK 1/4) до 16 дБ (32APSK 9/10), в припущенні, що робота проводиться в каналі з адитивним білим гаусівським шумом та ідеальним демодулятором. В результаті можна отримати збільшення ємності на 20–35% в порівнянні з DVB-S при однакових умовах передачі та на 2–2,5 дБ покращення при прийомі сигналу і при тій же спектральній ефективності.

## 2.2 Особливості перетворення цифрових потоків в передавальних і приймальних системах стандарту DVB-S2

Структурна схема передавальної частини стандарту DVB-S2 зображена на рис. 2.1.

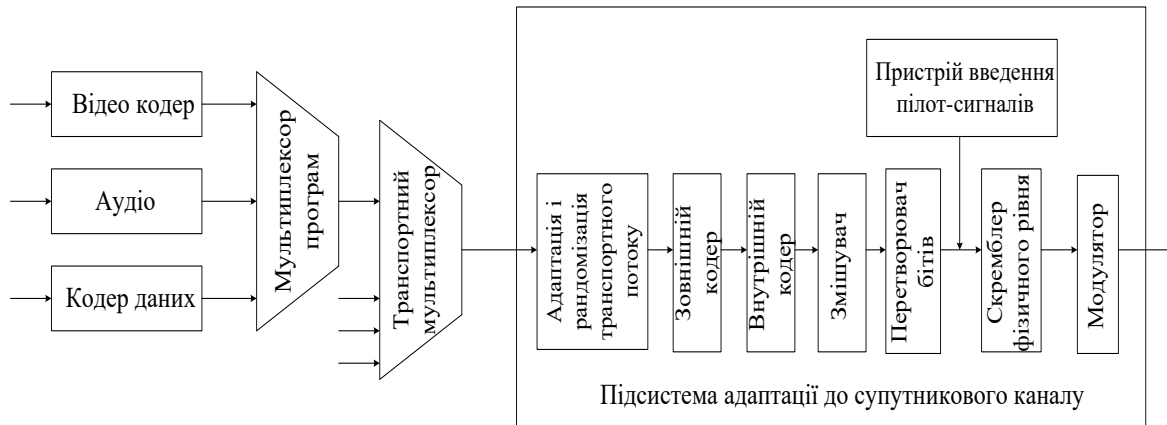


Рисунок 2.1 – Структурна схема передавальної частини системи супутникового цифрового телебачення стандарту DVB-S2

Процес рандомізації практично аналогічний реалізованому в стандарті DVB-S. Відмінність полягає тільки в довжині фрейму. Принципи зовнішнього і внутрішнього кодування суттєво відрізняються.

Корекція помилок – це ключовий інструмент для досягнення найкращих характеристик супутникового каналу передачі інформації в умовах високого рівня шумів та інтерференції. Для каналів з випадковим характером помилок (зазвичай із адитивними завадами типу “білий шум”) практичний інтерес представляють три види кодів: згортковий; Ріда-Соломона, турбокоди з низькою щільністю перевірки на парність LDPC (Low Density Parity Check Codes). Поєднання декількох схем завадостійкого кодування дозволяє врахувати різні умови експлуатації. Наприклад, згортковий код зазвичай використовується для передачі голосового трафіку, коли ймовірність помилки на біт може бути достатньо великою, проте не критичною для сприйняття і розуміння тієї інформації, що передається. При передачі даних, коли вимагається більш висока надійність, використовують каскадні коди, в яких зовнішнім зазвичай є код Ріда-Соломона, а внутрішнім – згортковий.

В процесі вибору кодів для нового стандарту проводилось комп’ютерне моделювання, в результаті якого була вибрана система, в

якості зовнішнього коду BCH-код (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem – Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема), а в якості внутрішнього – LDPC код, це в свою чергу дозволило максимально близько наблизитися до межі Шеннона для каналів із адитивним білим гаусівським шумом. Вибрані LDPC коди не критичні до затримок, оскільки використовують досить довгі блоки по 64800 біт. При цьому доступні наступні швидкості кодування – 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 і 9/10, які визначаються типом маніпуляції та надійністю каналу передачі. Швидкості 1/4, 1/3, 2/5 призначені для роботи з QPSK- маніпуляцією на ненадійних лініях, коли рівень сигналу наближений до рівня шуму.

### **2.3 Методи маніпуляції і завадостійкого кодування в стандарті DVB-S2**

Стандарт DVB-S2 використовує чотири типи маніпуляції – QPSK, 8PSK, 16APSK і 32APSK. Перші два використовуються у мережах мовлення. Передатчики транспондерів працюють в нелінійних режимах, близьких до насичення. Два інших використовуються, як правило, в професійних додатках, проте можуть використовуватися також з метою мовлення. Проте, в даному випадку необхідне більш високе співвідношення сигнал/шум на прийомі, а на передавальній стороні повинні застосовуватися методи, що направлені на компенсацію не лінійності транспондера. Дані види маніпуляції вимагають великих затрат потужності, проте вони дають велику ефективність по використанню спектра. Сузір'я 16APSK і 32APSK оптимізовані для роботи через нелінійний транспондер шляхом розміщення точок на одиничному колі. При роботі через лінійний тракт їх характеристики подібні з 16QAM і 32QAM відповідно.

Вибираючи тип маніпуляції та швидкість кодування, можна змінювати ефективність використання спектра від 0,5 до 4 біт на символ. При цьому потрібно враховувати характеристики транспондера, що використовується.

DVB-S2, на відміну від DVB-S, має три значення коефіцієнта згладжування (roll of factor), які встановлюють різну ступінь ефективності використання спектра:  $\alpha = 0,35; 0,25; \text{ і } 0,20$ . Більш низькі значення коефіцієнту забезпечують велику крутизну фронтів несучої, що дозволяє



розміщувати сусідні несучі щільніше один від одного, і відповідно, ефективніше використовувати спектр.

Розглянемо особливості зовнішнього та внутрішнього канального кодування в стандарті DVB-S2.

Кожний груповий кадр ( $C_{\text{group}}$  біт) обробляється підсистемою FEC кодування. Біти перевірки BCH зовнішнього кодування додаються після вхідного групового фрейму, а біти контролю парності внутрішнього кодування LDPC додаються після BCH FEC поля (див. рис. 2.2) [10].

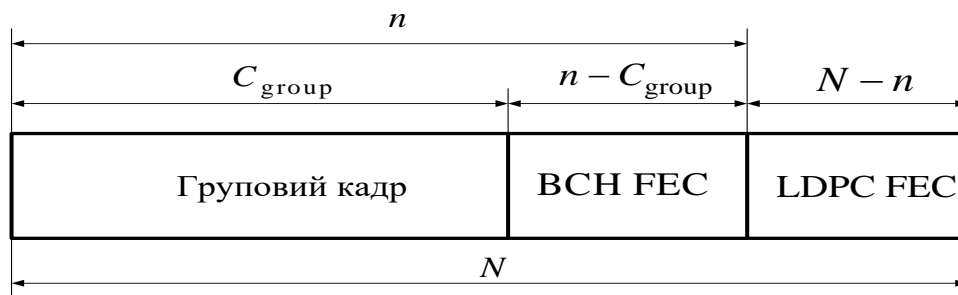


Рисунок 2.2 – Структура потокового FEC-кадра стандарту DVB-S2

В табл. 2.1 представлені параметри кодування для нормального FEC фрейму ( $N = 64\,800$  біт).

Таблиця 2.1

| LDPC код | Блок $C_{\text{group}}$ | Блок $n$ | BCH корекція помилок | LDPC блок $N$ |
|----------|-------------------------|----------|----------------------|---------------|
| 1/4      | 16008                   | 16200    | 12                   | 64800         |
| 1/3      | 21408                   | 21600    | 12                   | 64800         |
| 2/5      | 25728                   | 25920    | 12                   | 64800         |
| 1/2      | 32208                   | 32400    | 12                   | 64800         |
| 3/5      | 38688                   | 38880    | 12                   | 64800         |
| 2/3      | 43040                   | 43200    | 10                   | 64800         |
| 3/4      | 48408                   | 48600    | 12                   | 64800         |
| 4/5      | 51648                   | 51840    | 12                   | 64800         |
| 5/6      | 53840                   | 54000    | 10                   | 64800         |
| 8/9      | 57472                   | 57600    | 8                    | 64800         |
| 9/10     | 58192                   | 58320    | 8                    | 64800         |

Кожний нормальний FEC кадр з послідовністю 64800 біт перетворюється в паралельний код, рівень паралельності дорівнює 2 для QPSK, 3 для 8PSK, 4 для 16APSK і 5 для 32APSK. Кожна паралельна послідовність відображається в сузір'ї, внаслідок чого створюються послідовності різної довжини, в залежності від виду маніпуляції  $\eta_{\text{mod}}$ . Вхідна послідовність FEC фрейм, вихідна послідовність XFEC фрейм, що складається з  $64800/\eta_{\text{mod}}$  або  $16200/\eta_{\text{mod}}$  (для скороченого фрейму) символів маніпуляції.

Для 8PSK система застосовує відображення бітів згідно сузір'я, що зображене на рис. 2.3. Біти  $3i, 3i+1, 3i+2$  на виході змішувача визначають 8PSK- символ, де  $i = 0, 1, 2, \dots, (N/3) - 1$  і  $N$  є розміром LDPC кодованого блоку.

16APSK сузір'я складається з двох кілець з рівномірно розташованими 4 і 12 PSK точками, у внутрішньому радіусі  $R_1$  і зовнішньому радіусі кола  $R_2$  (див. рис. 2.4). Відношення зовнішнього радіусу кола до внутрішнього ( $\gamma = R_2 / R_1$ ) представлено в табл. 2.2. Біти  $4i, 4i+1, 4i+2, 4i+3$  з виходу змішувача визначають 8PSK- символ, де  $i = 0, 1, 2, \dots, (N/4) - 1$ .

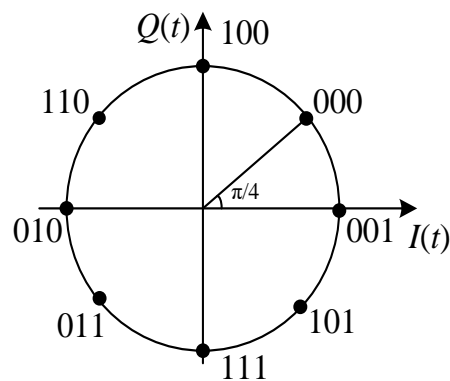


Рисунок 2.3 – Зображення комбінацій бітів на 8PSK- сузір'ї

Сузір'я 32APSK складається із трьох кілець з рівномірно розташованими 4, 12 і 16PSK точками, з внутрішнім радіусом  $R_1$ , середнім  $R_2$  і зовнішнім  $R_3$  (див. рис. 2.5). В табл. 2.3 представлені значення для  $\gamma_1 = R_2 / R_1$  і  $\gamma_2 = R_3 / R_1$ . Біти  $5i, 5i+1, 5i+2, 5i+3, 5i+4$  з виходу

змішувача визначають 8PSK- символ, де  $i=0,1,2,\dots,(N/5)-1$  і  $N$  є розміром LDPC кодованого блоку [10–13].

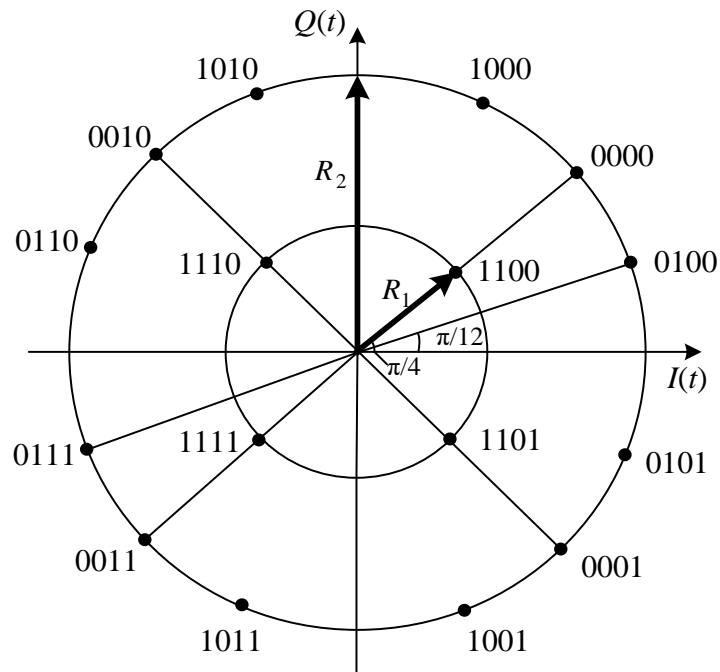


Рисунок 2.4 – Зображення комбінацій бітів на 16APSK- сузір'ї

Таблиця 2.2

| Кодова швидкість | Спектральна ефективність маніпуляція/кодування | $\gamma = R_2 / R_1$ |
|------------------|--|----------------------|
| 2/3              | 2,66   | 3,15                 |
| 3/4              | 2,99   | 2,85                 |
| 4/5              | 3,19   | 2,75                 |
| 5/6              | 3,32   | 2,70                 |
| 8/9              | 3,55   | 2,60                 |
| 9/10             | 3,59   | 2,57                 |

Таблиця 2.3

| Кодова швидкість | Спектральна ефективність маніпуляція/кодування | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ |
|------------------|--|------------|------------|
| 3/4              | 3,74   | 2,84       | 5,27       |
| 4/5              | 3,99   | 2,72       | 4,87       |
| 5/6              | 4,15   | 2,64       | 4,64       |
| 8/9              | 4,43   | 2,54       | 4,33       |
| 9/10             | 4,49   | 2,53       | 4,30       |

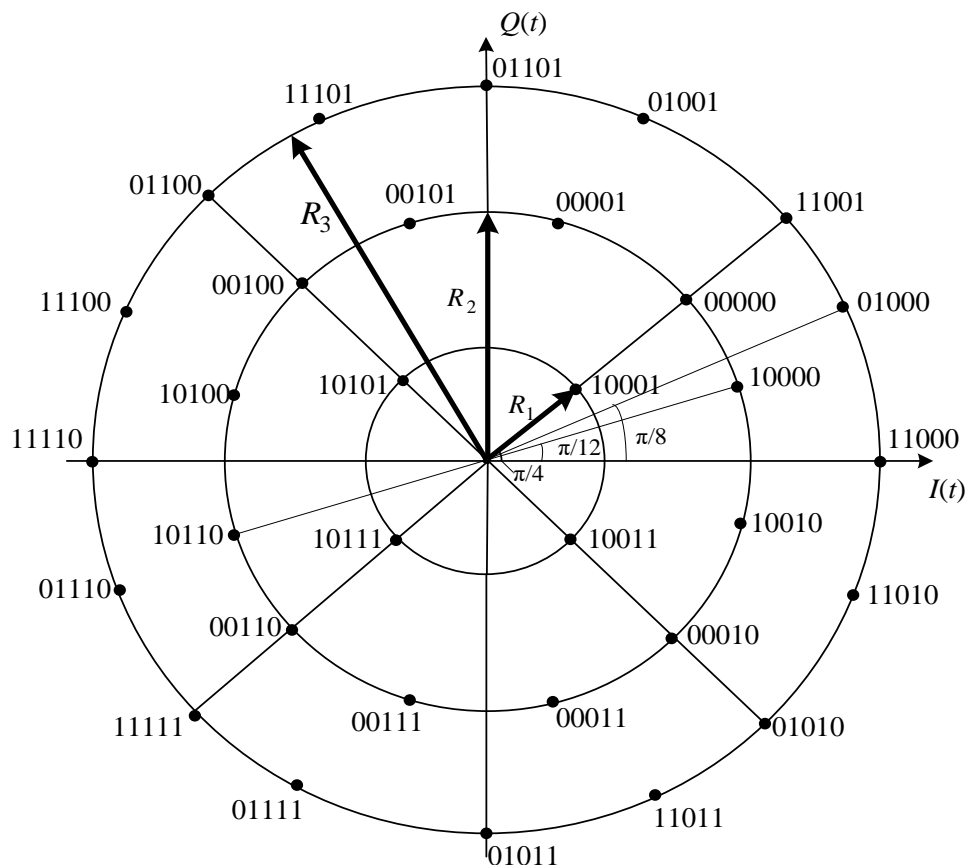


Рисунок 2.5 – Зображення комбінацій бітів на 32APSK-сузір'ї

В табл. 2.4 представлені порівняльні характеристики між DVB-S і DVB-S2 мовленням, за допомогою супутникового транспондера зі смугою пропускання 36 MHz, при використанні 60 см приймальної антени. Як видно з табл. 2.4, при ідентичному відношенні сигнал/шум смуга пропускання DVB-S2 транспондера збільшена більше ніж на 30%, відносно DVB-S транспондера. Це в свою чергу дозволяє здійснювати мовлення від 21 до 26 (AVC) каналів стандартної якості і 5-6 (AVC) каналів високої якості кожним DVB-S2 транспондером [10–13].

В залежності від вибраної кодової швидкості і маніпуляції, система може функціонувати з відношенням сигнал/шум вище 5,1 дБ, використовуючи QPSK з кодовою швидкістю 2/3 або 3/4, і вище 7,8 дБ при QPSK з кодовою швидкістю 7/8 або 8PSK з кодовою швидкістю 2/3.

Велика кількість встановлених приймачів стандарту DVB-S значно ускладнює процес переходу на новий стандарт. В свою чергу, коли завершиться перехід заміни приймачів, що транслують сигнал в режимі зворотної сумісності всім клієнтам буде наданий повний пакет послуг

DVB-S2. Режими зворотної сумісності здійснюють передачу двох транспортних потоків в одному супутниковому каналі. Ці потоки мають різні пріоритети – високий і низький. Перший потік, що має високий пріоритет, сумісний як з приймачами DVB-S2, так і з приймачами DVB-S. Другий потік, з низьким пріоритетом, підтримується тільки приймачами DVB-S2. Передача цих потоків здійснюється через використання ієрархічної маніпуляції. Ієрархічна маніпуляція дозволяє комбінувати два потоки синхронно в одному маніпульованому символі неоднорідного сузір'я 8PSK. DVB-S2 спільний потік низького пріоритету кодується кодами LDPC/VCH з швидкостями згортки 1/4, 1/3, 1/2 або 3/5. Після цього перетворювач координат генерує неоднорідне сузір'я 8PSK, в якому два біти потоку DVB-S високого пріоритету визначають точку сузір'я QPSK, в той час як один біт з кодера DVB-S2 LDPC зміщується на певний кут перед подачею в канал. Таким чином, результуючий сигнал має квазіпостійну форму та може бути переданий через один транспондер, що працює в режимі, який близький до насичення.

Таблиця 2.4

| EIRP (dBW)                                      | 51                    |                     | 53,7                |                     |
|---|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Стандарт  | DVB-S                 | DVB-S2              | DVB-S               | DVB-S2              |
| Маніпуляція і кодування                         | QPSK 2/3              | QPSK 3/4            | QPSK 7/8            | PSK-8 2/3           |
| Символьна швидкість (МБод)                      | 27,5                  | 30,9                | 27,5                | 29,7                |
| Відношення сигнал/шум (дБ)                      | 5,1                   | 5,1                 | 7,8                 | 7,8                 |
| Швидкість передачі інформаційних бітів (Мбіт/с) | 33,8                  | 46                  | 44,4                | 58,8                |
| Кількість програм стандартної якості            | 7 MPEG-2<br>15 AVC    | 10 MPEG-2<br>21 AVC | 10 MPEG-2<br>20 AVC | 13 MPEG-2<br>26 AVC |
| Кількість програм високої якості                | 1-2 MPEG-2<br>3-4 AVC | 2 MPEG-2<br>5 AVC   | 2 MPEG-2<br>5 AVC   | 3 MPEG-2<br>6 AVC   |

## 2.4 Розподілення поляризаційно-частотних ресурсів супутникових ретрансляторів

В якості прикладу розглянемо частотний план транспондерів супутника Hot Bird 8. Даний супутник запущений на геостационарну орбіту з точкою стояння  $13^{\circ}$  східної довготи 4 серпня 2006 року і має на борту 64 транспондера Ku діапазону. Схема розподілення поляризаційно-частотних ресурсів супутника Hot Bird 8 представлена на рис. 2.6 у вигляді спектра транспондерів.

Символьна швидкість передачі  $R_s$  може бути підібрана для конкретного транспондера, для досягнення максимальної швидкості передачі інформації з прийнятним рівнем сигналу. Параметри корисної бітової швидкості  $R$ , що доступні на супутникових транспондерах зі смугою пропускання  $\Delta F$ , що відповідає  $\Delta F / R_s = 128$  представлені в табл. 2.5.

Для зручності врахування виду поляризації супутникового сигналу при його перетворенні на проміжну частоту 950–2150 MHz весь діапазон частот вхідних телевізійних каналів Ku діапазону 10,7–12,75 ГГц умовно ділиться на чотири діапазони: HL (Horizontal Low), HH (Horizontal High), VL (Vertical Low) і VH (Vertical High) (див. рис. 2.7).

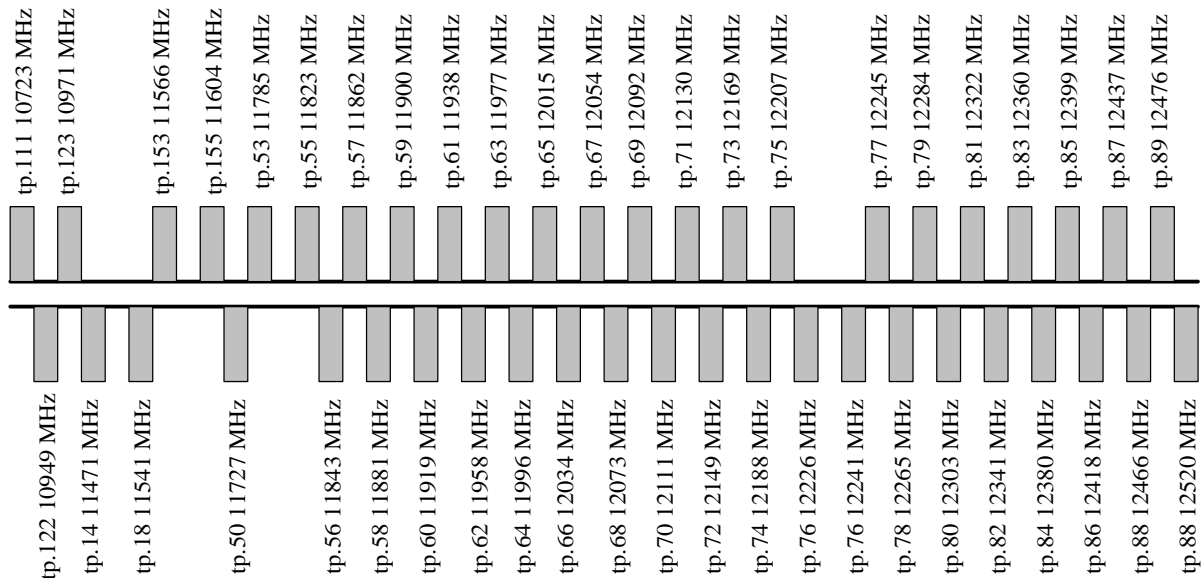


Рисунок 2.6 – Спектр транспондерів супутника Hot Bird 8

Таблиця 2.5

| Смуга пропускання (3 дБ), МГц | Смуга пропускання (-1 дБ), МГц | $R_s$ (МБод) | $R$ (QPSK 1/2) (Мбіт/с) | $R$ (QPSK 2/3) (Мбіт/с) | $R$ (QPSK 3/4) (Мбіт/с) | $R$ (QPSK 5/6) (Мбіт/с) | $R$ (QPSK 7/8) (Мбіт/с) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 54                            | 48,6                           | 42,2         | 38,9                    | 51,8                    | 58,3                    | 64,8                    | 68,0                    |
| 46                            | 41,4                           | 35,9         | 33,1                    | 44,2                    | 49,7                    | 55,2                    | 58,0                    |
| 40                            | 36                             | 31,2         | 28,8                    | 38,4                    | 43,2                    | 48,0                    | 50,4                    |
| 36                            | 32,4                           | 28,1         | 25,9                    | 34,6                    | 38,9                    | 43,2                    | 45,4                    |
| 33                            | 29,7                           | 25,8         | 23,8                    | 31,7                    | 35,6                    | 39,6                    | 41,6                    |
| 30                            | 27                             | 23,4         | 21,6                    | 28,8                    | 32,4                    | 36,0                    | 37,8                    |
| 27                            | 24,3                           | 21,1         | 19,4                    | 25,9                    | 29,2                    | 32,4                    | 34,0                    |
| 26                            | 23,4                           | 20,3         | 18,7                    | 25                      | 28,1                    | 31,2                    | 32,8                    |

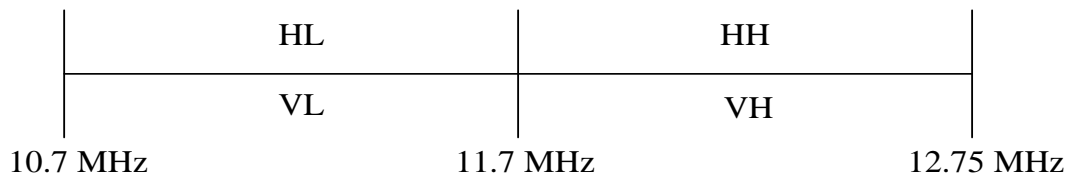


Рисунок 2.7 – Врахування виду поляризації при перетворенні сигналу

## 2.5 Квадратурно-фазова маніпуляція (QPSK)

Квадратурно-фазова маніпуляція QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – метод фазової маніпуляції, який фактично здійснює передачу двох інформаційних біт одним символом. Іншими словами, QPSK символ не уявляє собою 0 або 1, а є комбінацією 00, 01, 10 або 11.

З теорії зв'язку відомо, що двійкова фазова маніпуляція BPSK (Binary Phase Shift Keying) є найбільш завадостійким методом маніпуляції. Проте в багатьох випадках за рахунок зменшення завадостійкості каналу зв'язку можна збільшити його пропускну здатність.

Слід зазначити, що при застосуванні QPSK маніпуляції символна швидкість в два рази менша ніж швидкість передачі інформаційних біт. Якщо раніше одним символом кодувався один інформаційний біт, то швидкість передачі інформації  $V_r$  співпадала з символною швидкістю передавача  $S_r$ . Проте якщо одним символом ми передаємо одразу два



інформаційних біти, то символна швидкість передавача дорівнює  $S_r = \frac{V_r}{2}$ .

Тривалість одного символу  $T = 2T_r$  в два рази більша тривалості одного інформаційного біта.

При формуванні QPSK сигналу використовують чотири значення фази несучого колювання. В даному випадку фаза  $S_{QPSK}(t)$  сигналу  $\varphi_0$  повинна приймати чотири значення:  $0^0$ ,  $90^0$ ,  $180^0$  і  $270^0$ . Проте частіше використовуються інші значення фаз:  $45^0$ ,  $135^0$ ,  $225^0$  і  $315^0$ . Розглянемо принцип формування QPSK сигналу за допомогою векторної діаграми, що зображена на рис. 2.8.

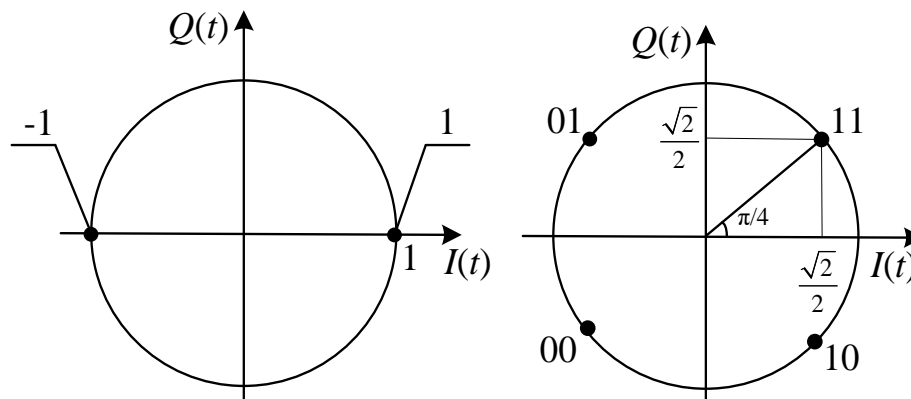


Рисунок 2.8 – Векторна діаграма QPSK-сигналу

Для того, щоб здійснити кодування одним символом двох інформаційних біт, необхідно, щоб сузір'я складалося з чотирьох точок, так як це зображено на рис. 2.8. Тоді отримаємо, що синфазна складова  $I(t)$  і квадратурна  $Q(t)$  складова QPSK сигналу відмінні від нуля, всі точки сузір'я розташовані на одиничному колі. Тоді кодування можна здійснити наступним чином: розбити потік інформаційних біт на парні і непарні біти, тоді синфазна складова  $I(t)$  буде кодувати парні біти, а квадратурна складова  $Q(t)$  – непарні. Два послідовно ідучих один за одним інформаційних біти кодуються одночасно синфазною  $I(t)$  та квадратурною  $Q(t)$  складовою сигналу. Це наглядно продемонстровано на осцилограмах, що зображені на рис. 2.9 для інформаційного потоку “1100101101100001”.

На верхній осцилограмі вхідний інформаційний потік розділений на пари біт, які відповідають одній точці сузір'я QPSK сигналу, що зображена на рис. 2.8. Звернемо увагу, що інформаційні біти нумеруються з нуля, а не з одиниці, перший в черзі біт має номер 0, тому він є парним. Якщо парний інформаційний біт дорівнює  $r=1$ , тоді  $I(t)>0$ . Якщо парний інформаційний біт дорівнює  $r=0$ , тоді  $I(t)<0$ . Аналогічно працює квадратурний канал  $Q(t)$ , проте тільки по непарним інформаційним бітам.

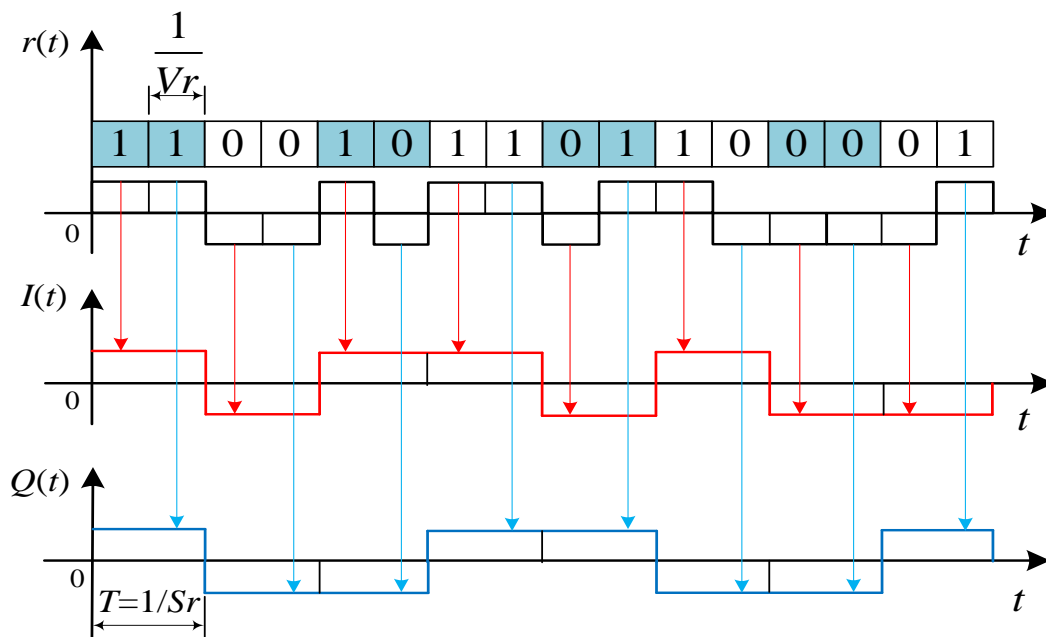


Рисунок 2.9 – Синфазна і квадратурна складові QPSK сигналу

$$\begin{cases} r=1 \rightarrow I(t) > 0, Q(t) > 0; \\ r=0 \rightarrow I(t) < 0, Q(t) < 0. \end{cases}$$

Структурна схема QPSK модулятора на основі універсального квадратурного модулятора зображена на рис. 2.10.

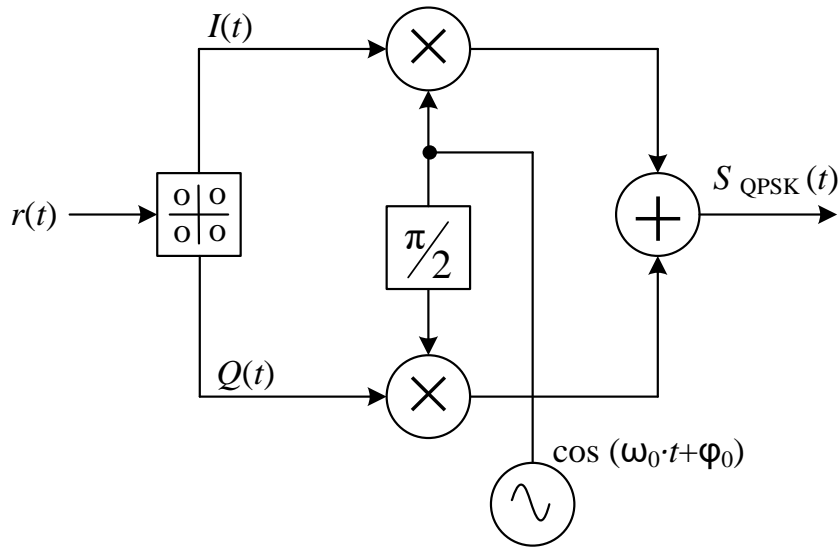


Рисунок 2.10 – Структурна схема QPSK модулятора

Сигнал  $S_{QPSK}(t)$  має наступний вигляд:

$$S_{QPSK}(t) = I(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) - Q(t)\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t)), \quad (2.1)$$

де  $A(t)$  – комплексна огибаюча QPSK сигналу.

Оскільки вхідний потік інформаційних бітів  $r(t)$  приймає значення 0 і 1, то синфазна  $I(t)$  і квадратурна  $Q(t)$  складові комплексної огибаючої  $A(t) = I(t) + jQ(t)$  QPSK сигналу дорівнюють:

$$I(t) = r(t)\cos(\varphi(t));$$

$$Q(t) = r(t)\sin(\varphi(t)).$$

Наприклад, використовуючи сигнальне сузір'я QPSK сигналу запишемо його аналітичний вираз для комбінації інформаційних бітів "11" (див. рис. 2.8):

$$S_{QPSK}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2}\cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Також QPSK сигнал можна представити через його комплексну огибаючу:

$$S_{QPSK}(t) = \operatorname{Re} |A(t)\exp(j\omega_0 t)|. \quad (2.2)$$

З комплексної огибаючої  $A(t)$  також можна отримати амплітудну огибаючу QPSK сигналу

$$a(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}. \quad (2.3)$$

Слід зазначити, що амплітудна огибаюча QPSK сигналу дорівнює одиниці всюди, за винятком моментів зміни символів, що передаються, тобто в моменти перекосу фази та переходу до іншої точки сузір'я.

З комплексної огибаючої можна виділити фазову огибаючу, а саме:

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \left( \frac{Q(t)}{I(t)} \right). \quad (2.4)$$

Фазова огибаюча  $\varphi(t)$  для інформаційного потоку "1100101101100001" зображена на рис. 2.11.

Фазова огибаюча є ступінчатою функцією часу, що зазнає розриви в моменти зміни символу QPSK сигналу. При цьому в межах одного символу векторна діаграма QPSK сигналу знаходиться в одній точці сузір'я, а при зміні символу – стрибкоподібно переходить в точку, що відповідає наступному символу. Оскільки у QPSK сигналу всього чотири точки в сузір'ї, то фазова огибаюча може приймати всього чотири значення:  $\pm \frac{\pi}{4}$  і  $\pm \frac{3\pi}{4}$ .

На рис. 2.12 зображена осцилограма QPSK сигналу для інформаційного бітового потоку "1100101101100001" при швидкості передачі інформації  $V_r = 10$  кбіт/с і несучій частоті 20 кГц.

Фільтри Найквіста дозволяють забезпечити передачу BPSK сигналу зі швидкістю 1 біт/с на 1 Гц смуги сигналу при виключенні між символної інтерференції на приймальній стороні. Проте такі фільтри неможливо реалізувати, тому на практиці використовують фільтри, що забезпечують 0,5 біт/с на 1 Гц смуги сигналу. У випадку з QPSK сигналом швидкість передачі  $V_r$  інформації вдвічі більша символної швидкості  $S_r$ , тоді використання фільтрів з АЧХ виду "піднятого косинуса" дає нам можливість передавати 0,5 символу в секунду на 1 Гц смуги, або 1 біт/с цифрової інформації на 1 Гц смуги частот.

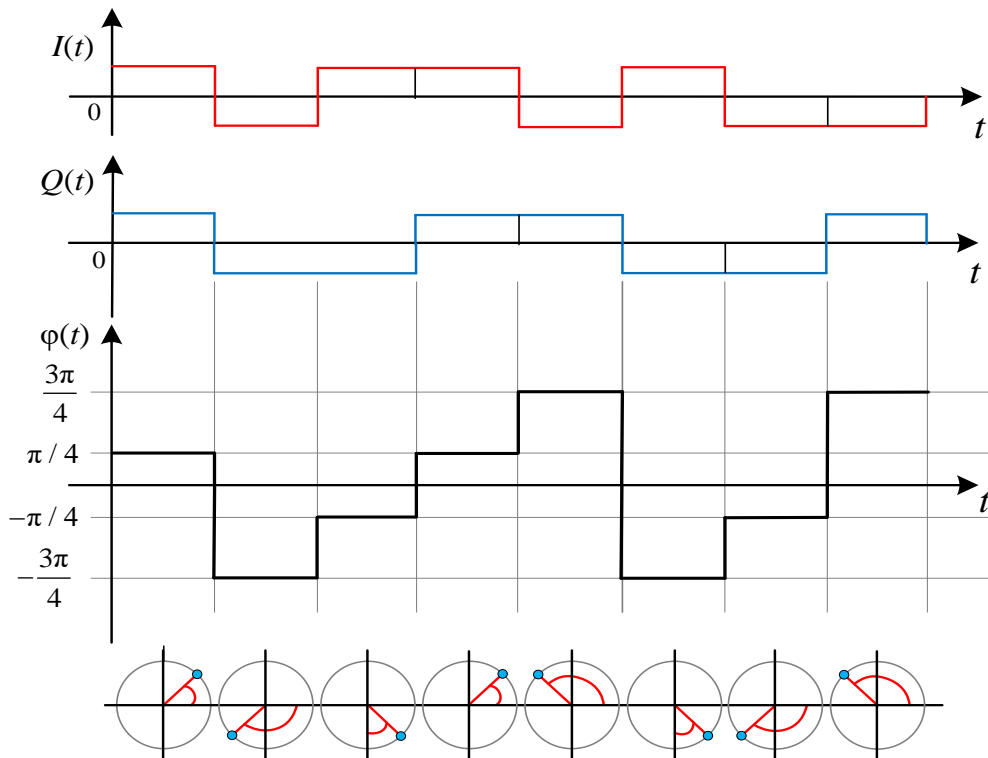


Рисунок 2.11 – Фазова огинаюча QPSK сигналу

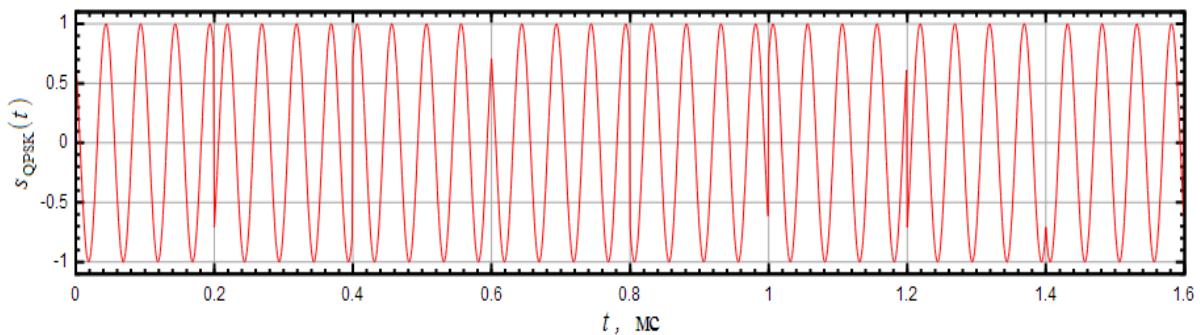


Рисунок 2.12 – Осцилограма QPSK сигналу

Отримання фільтра з характеристикою “піднятого косинуса” отримується шляхом перемноження імпульсної характеристики ідеального фільтра Найквіста  $h(t)$  на вагове вікно  $w(t)$ :

$$h(t) = \text{sinc}\left(\frac{\pi t}{T}\right) w(t);$$

$$w(t) = \frac{\cos\left(\frac{\pi \beta t}{T}\right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}}, \quad (2.5)$$

де  $\text{sinc} = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}; & x \neq 0 \\ 1 & ; x = 0 \end{cases}$  – нормована sinc-функція:

$\beta$  – коефіцієнт згладжування, що приймає значення від 0 до 1. Якщо  $\beta = 0$ , то  $w(t) = 1$ , і відповідно, ми отримуємо ідеальний фільтр Найквіста.

Запишемо математичний вираз, який описує АЧХ фільтра з характеристикою “піднятого косинуса”:

$$|H(f)| = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |f| < \frac{1-\beta}{2T}; \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right), & \text{якщо } \frac{1-\beta}{2T} < |f| < \frac{1+\beta}{2T}; \\ 0, & \text{якщо } |f| > \frac{1+\beta}{2T}. \end{cases}$$

На рис. 2.13 зображена АЧХ фільтра з характеристикою “піднятого косинуса”.

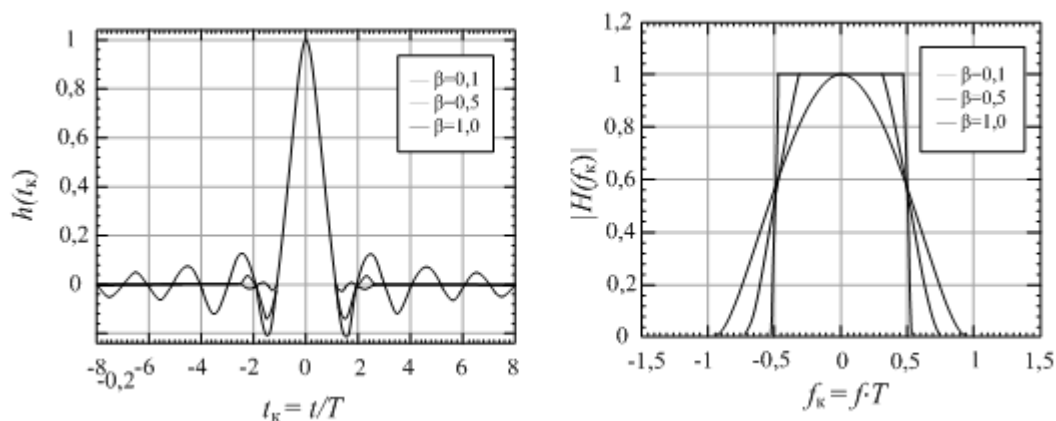


Рисунок 2.13 – АЧХ фільтра з характеристикою “піднятого косинуса”

На рис. 2.14 зображені спектри  $|S_{BPSK}(f)|^2$  і  $|S_{QPSK}(f)|^2$  при використанні фільтрів Найквіста з параметром  $\beta = 1$ .

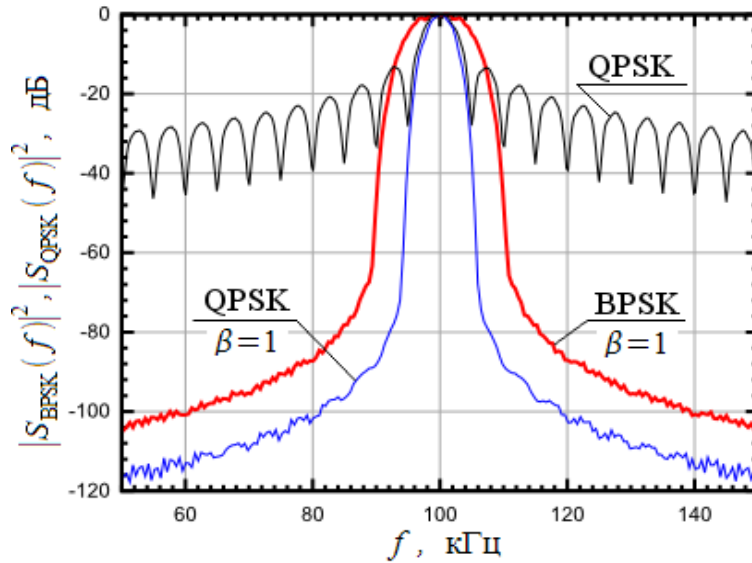


Рисунок 2.14 – Спектр BPSK і QPSK сигналу при використанні фільтра Найквіста з параметром  $\beta = 1$

На рис. 2.14 чорним кольором зображений спектр QPSK сигналу без використання фільтра. Видно, що використання фільтра Найквіста дозволяє повністю подавити бокові пелюстки як в спектрі BPSK так і в спектрі QPSK сигналів. Структурна схема QPSK модулятора при використанні фільтра зображена на рис. 2.15.

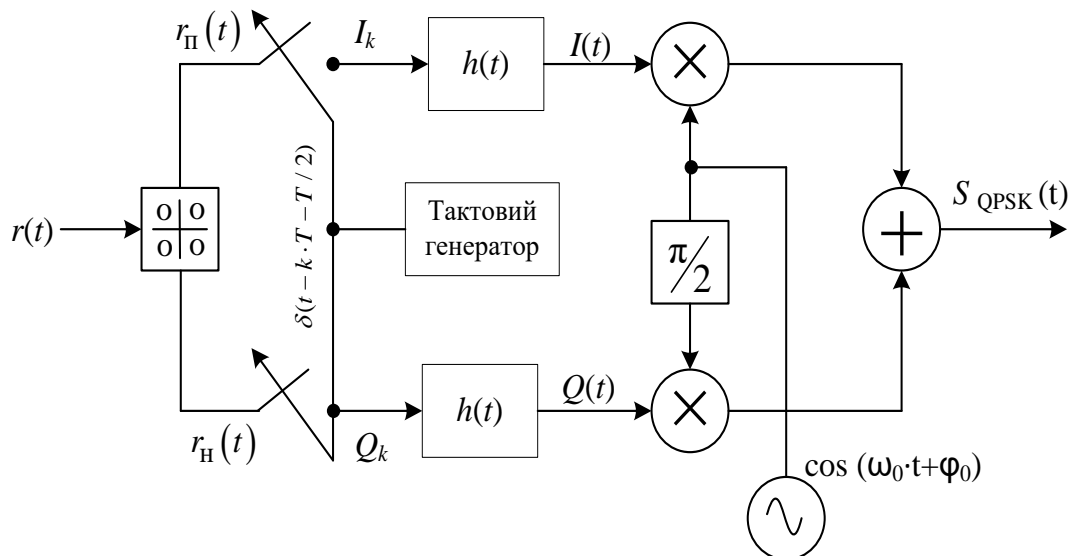


Рисунок 2.15 – Структурна схема QPSK модулятора з використанням фільтра Найквіста



Осцилограми, що пояснюють принцип роботи QPSK модулятора зображені на рис. 2.16.

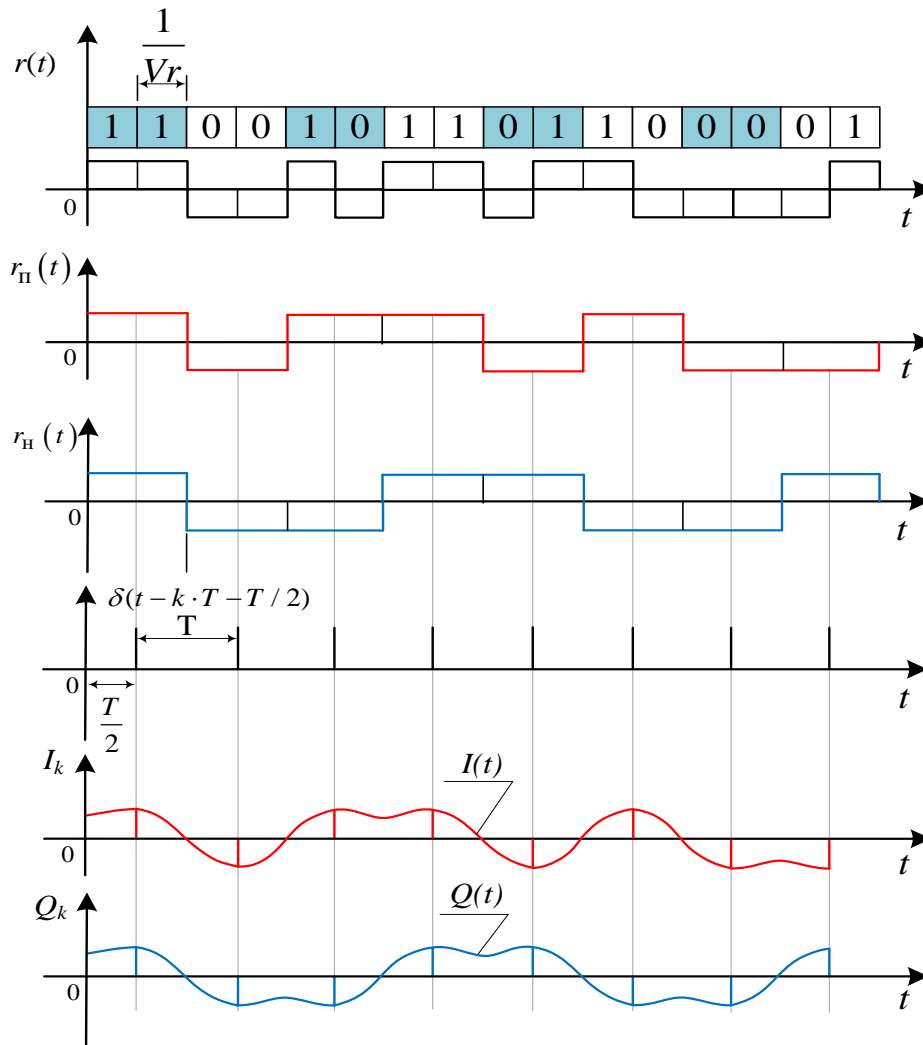


Рисунок 2.16 – Осцилограми на входних та вихідних гілках QPSK модулятора

Інформаційний цифровий потік бітів надходить зі швидкістю  $V_r$  і перетворюється в парні  $r_{II}(t)$  та непарні  $r_H(t)$  символи з тривалістю  $T = \frac{1}{S_r} = \frac{2}{V_r} = 2T_r$ . Тактовий генератор видає послідовність дельта-імпульсів з періодом  $\frac{T}{2}$ , які віднесені до центру імпульсів  $r_{II}(t)$  і  $r_H(t)$ , як це зображено на четвертій осцилограмі. Імпульси тактового генератора стробують сигнали  $r_{II}(t)$  і  $r_H(t)$  за допомогою ключів, в результаті чого отримуємо відліки  $I_k$  і  $Q_k$ , що зображені на двох останніх осцилограмах рис. 2.16.

Отримані відліки  $I_k$  і  $Q_k$  збуджують фільтр Найквіста з імпульсною характеристикою  $h(t)$ , на виході якого отримуємо синфазну  $I(t)$  і  $Q(t)$  квадратурну складову комплексної огибаючої QPSK сигналу, які надходять на універсальний квадратурний модулятор. На виході квадратурного модулятора отримуємо QPSK сигнал з подавленими боковими пелюстками спектра.

Звернемо увагу, що синфазна  $I(t)$  і квадратурна  $Q(t)$  складова QPSK сигналу стають неперервними функціями часу, в результаті вектор комплексної огибаючої вже не знаходиться у точках сузір'я, перестрибуючи під час зміни символу, а неперервно рухається комплексною площиною (див. рис. 2.17).

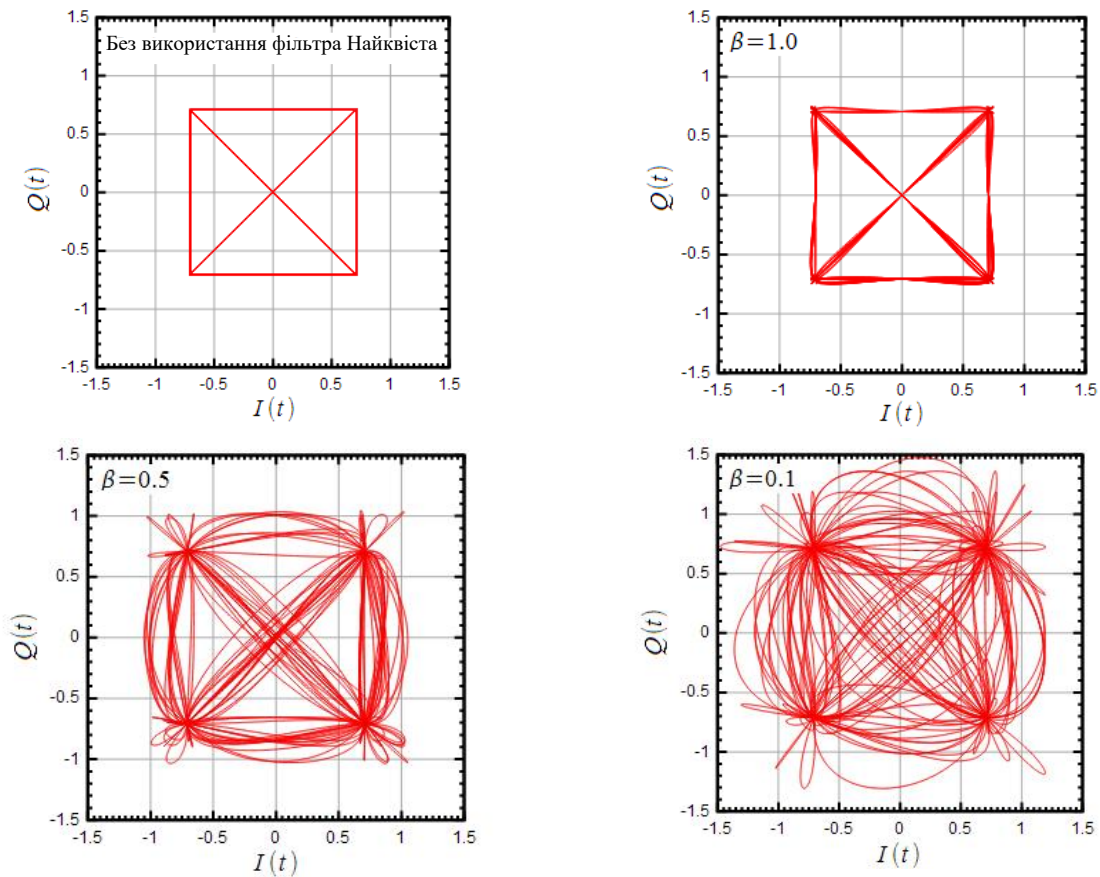


Рисунок 2.17 – Траєкторії руху вектора комплексної огибаючої QPSK сигналу при різних коефіцієнтах згладжування  $\beta$  фільтра Найквіста

На верхньому лівому графіку зображена векторна діаграма стрибкоподібного переміщення вектора комплексної огибаючої за відсутності формуючого фільтра. Якщо увімкнути фільтр Найквіста, то

при зменшенні коефіцієнта згладжування  $\beta$  векторна діаграма перетворюється в “клубок”. При  $\beta=1$  отримуємо найкраще наближення до ідеальної діаграми.

При неперервному русі вектора комплексної огибаючої його амплітуда починає змінюватися в часі, отже у QPSK сигналу при використанні фільтра Найквіста починає змінюватися амплітудна огибаюча  $a(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$ , що наглядно продемонстровано на рис. 2.18.

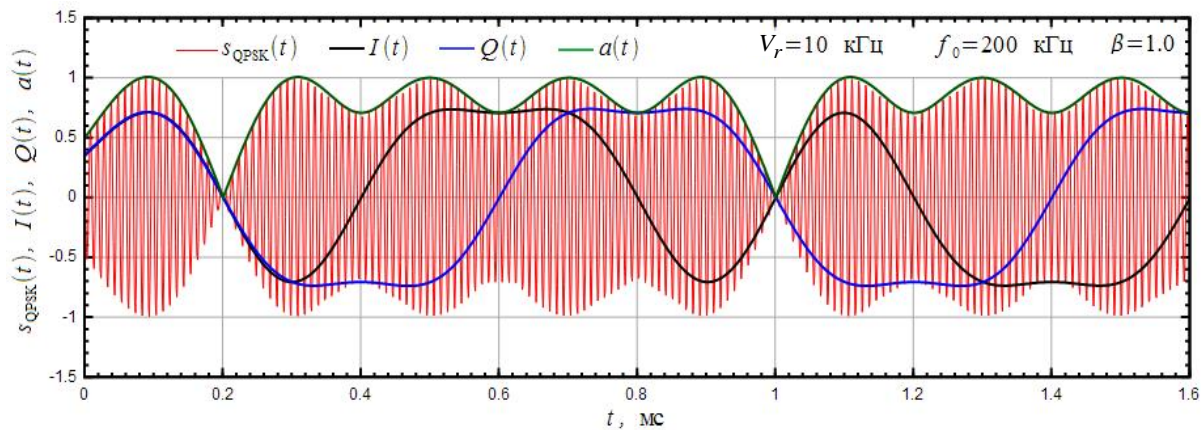


Рисунок 2.18 – Осцилограма QPSK сигналу при використанні фільтра Найквіста

З рис. 2.18 видно, що фільтр Найквіста призводить до появи паразитної амплітудної маніпуляції. При цьому в точках коли синфазна  $I(t)$  і квадратурна  $Q(t)$  складова дорівнюють нулю, амплітудна огибаюча QPSK сигналу також падає до нуля, і фаза сигналу повертається на  $\pi$  радіан. Негативний ефект глибокої амплітудної маніпуляції усувається за допомогою офсетної (OQPSK) маніпуляції. Важливо відмітити, що при неперервних синфазній  $I(t)$  і квадратурній  $Q(t)$  складових QPSK сигналу фазова огибаюча (2.4) також стає непевною функцією часу і перестає змінюватися стрибкоподібно, а плавно переходить від символу до символу, що в свою чергу призводить до звуження спектра QPSK сигналу при використанні фільтра Найквіста.

## Питання для самоконтролю до розділу 2

1. Надайте загальну характеристику стандарту DVB-S2. Поясніть ключові відмінності від стандарту DVB-S.
2. Надати визначення поняттю модуляція, маніпуляція.
3. Які типи маніпуляції застосовані в стандарті DVB-S2?
4. Що таке корекція помилок?
5. Які три види кодів застосовуються для каналів із випадковим характером помилок (зазвичай з адитивними завадами типу “білий шум”)? Назвіть їх переваги та недоліки.
6. Скільки інформаційних біт передається одним символом при використанні квадратурно-фазової маніпуляції (QPSK). Чому дорівнює символна швидкість передавача?
7. Зобразіть спрощену структурну схему QPSK модулятора (без використання фільтра Найквіста).

### СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

#### 3.1 Загальні відомості про спеціальну підсистему резервного зв'язку Ka-Sat VSAT eTria

Спеціальна підсистема резервного зв'язку Ka-Sat VSAT eTria – призначена для організації двостороннього супутникового зв'язку в Ka-діапазоні та забезпечує маршрутизацію трафіку з наданням сервісів передачі даних і відкритої телефонії.

Супутниковий Інтернет Tooway – послуга, що надається компанією Eutelsat на території всієї Європи через супутник Ka-Sat, розташований у позиції 9° с.д. (83 Ka-band транспондера, обсяг ресурсу – 20 ГГц), що працює в Ka-діапазоні (20/30 ГГц).

Супутник Ka-Sat (рис. 3.1) є унікальним, оскільки він розроблявся винятково для надання супутникового Інтернету Tooway на супутникові антени невеликого діаметра (до 75 см).

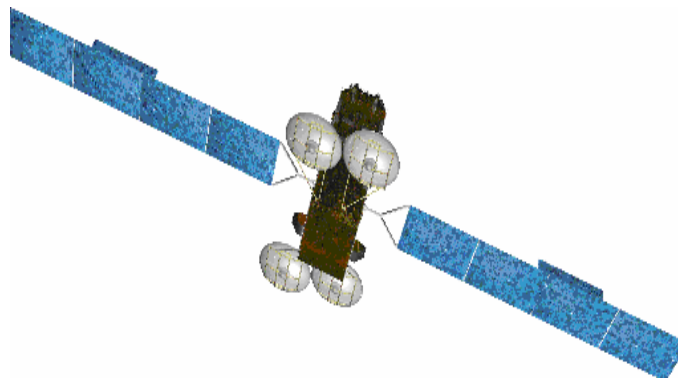


Рисунок 3.1 – Телекомунікаційний супутник зв'язку високої пропускної спроможності Ka-Sat

Конструктивно супутник обладнаний чотирма багатоканальними антенами, що розкриваються, і ретранслятором підвищеної точності та ефективності. Приймальна апаратура здатна формувати 82 точкових промені, що робить Ka-Sat найпередовішим мультипроменевим супутником, розробленим у світі на сьогоднішній день. На один точковий промінь виділена смуга частот 237 МГц транспондера, забезпечуючи пропускну здатність порядку 475 Мбіт/с на точку. Потужність, що виділяється на корисне навантаження становить близько 14 кВт. Сонячна батарея забезпечує максимальну потужність до 16 кВт на початку активного існування. Маса корисного навантаження близько 1000 кг, суха

маса становить близько 3170 кг, маса під час запуску була 6100 кг. Час життя на орбіті оцінюється в 16 років за запасами палива, необхідним підтримки орбітальної позиції.

За даними Eutelsat, Ka-Sat потенційно здатний забезпечити широкопasmовим доступом до Інтернету більше мільйона абонентів. Компанія інвестувала у програму близько € 350 млн, включаючи витрати на виробництво та запуск супутника. Ka-Sat забезпечує високий рівень багатоканального використання частот, що дозволяє системі досягти загальної ємності більше 90 Гбіт/с, що у 38 разів більше ємності стандартного телекомунікаційного супутника зв'язку, що веде мовлення в Ku-діапазоні. В результаті введення Ka-Sat, загальна пропускна здатність потроїлася.

Супутник працює у поєднанні з десятьма наземними телепортами (два з них – резервні), що забезпечують надання послуг Інтернет-шлюзу, частини сервісу двостороннього супутникового Інтернету Tooway, що належить Eutelsat. Всі вони пов'язані між собою “Ka-Sat кільцем” наземною телекомунікаційною мережею високої пропускної спроможності. Сервіс централізовано управляється з мережевого операційного центру SkyLogic у Турині (Італія) (Skylogic є дочірньою компанією Eutelsat).

Системи передачі даних, що використовуються на супутнику Ka-Sat, передаються на та від обладнання виробництва ViaSat: на телепорти Eutelsat (в Інтернет-шлюзи), систему вузлів зв'язку ViaSat “SurfBeam 2”; на стороні замовника, модем ViaSat “SurfBeam 2” який розташовано у клієнта.

Модем “SurfBeam 2”, виготовлений для сервісу Tooway – модифікована версія протоколу DOCSIS, адаптована корпорацією ViaSat до фізичних супутників зв'язку і застосовує передові технології маніпуляції в прямому каналі, тобто DVB-S2, і метод доступу до каналу, тобто MF-TDMA (мультичастотний-TDMA).

Тактико-технічні характеристики супутника зв'язку Ka-Sat приведені в табл. 3.1, а його зовнішній вигляд зображено на рис. 3.1.

Застосування системи Tooway дозволяє забезпечити ефективні, захищені, інтерактивні лінії зв'язку високої якості з сотнями та навіть з десятками тисяч віддалених пунктів. Віддалені термінали Tooway можуть забезпечувати двосторонній супутниковий зв'язок через мережу Інтернет.

Таблиця 3.1

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Оператор                            | Eutelsat  |
| Початкова точка                     | Космодром “Байконур”                            |
| Космічна ракета-носії               | Протон-М  |
| UTC дата запуску космічного корабля | 26 грудня 2010 року                             |
| Тип орбіти                          | Геостаціонарна орбіта                           |
| Знакова подія                       | Запуск ракети (2010 року, космодром “Байконур”) |

Провайдером послуги “супутникового двостороннього Інтернету Тоoway” є оператор зі світовим іменем, компанія SkyLogic, яка надає VSAT Інтернет доступ в 26 країнах Європи, включаючи Україну. Офіційний сайт компанії SkyLogic доступний за адресою [www.tooway.com](http://www.tooway.com). У країнах Європи VSAT Інтернет відомий під брендом Тоoway. Штаб квартира оператора SkyLogic розташована в Італії, Турін. Оператор SkyLogic є “донькою” компанії Eutelsat Франція (Eutelsat є власником супутника Ka-Sat 9E).

Технологія ViaSat SurfBeam використовує Ка-діапазон, що приблизно в два рази вищий по частоті ніж Ку-діапазон (табл. 3.2). Це передбачає вужчий промінь, який сприяє меншим розмірам кінцевих пристроїв.

Таблиця 3.2

|              | Лінія зв'язку “вниз” | Лінія зв'язку “вгору” |
|--------------|----------------------|-----------------------|
| Ка- діапазон | 17,7 ГГц – 20,2 ГГц  | 27,5 ГГц – 30,0 ГГц   |
| Ку- діапазон | 10,7 ГГц – 12,75 ГГц | 12,75 ГГц – 14,5 ГГц  |

Промені меншого розміру дозволяють більш ефективніше використовувати потужність супутника на прямому каналі та покращене G/T (підвищення температури) на зворотному каналі. Промені меншого розміру залучають менші стільники Землі (зона охоплення променя), що також дозволяє використовувати більше сотень у цій зоні обслуговування, збільшуючи повторне використання частот. Смуга частот в Ка-діапазоні має менше перешкод, ніж смуга частот в Ку-діапазоні, оскільки в цій зоні працює менше супутників.

Тоoway і ViaSat SurfBeam використовують технології DVB-S2 змінного кодування та маніпуляції [13].



### 3.2 Тактико-технічні характеристики супутникового зв'язку Tooway

Основні тактико-технічні характеристики системи супутникового зв'язку Tooway наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

| Оператор  | Eutelsat   |
|---|--|
| Основні складові  | Модем 1-IFL<br>Передавач TRIA-1-IFL<br>Антенa 0,77 м |
| Модем 1-IFL   |  |
| Проміжна частота:   | Передача – 300-800МГц RX<br>Прийом – 1800-2300МГц TX |
| 1 роз'єм Ethernet (1 Гбіт)  |  |
| Інтерфейс USB   |  |
| Живлення  | 110/220 В змінного струму                            |
| Графічний інтерфейс користувача для відображення інформації стану і установки терміналу |  |
| Споживана потужність  | 24 Вт  |
| Середній час безвідмовної роботи  | 22 роки  |
| Передавач TRIA-1-IFL  |  |
| Підсилювач  | 3 Вт   |
| Діапазон частот:  | Передача – 29,5...30 ГГц<br>Прийом – 19,7...20,2 ГГц |
| Еквівалентна ізотропна випромінювана потужність (ЕІВП)                                  | 48,4 дБВт (29,75 ГГц)                                |
| Шумова температура  | 17,2 дБ/К (19,95 ГГц)                                |
| Електромагнітний перемикач поляризації (гарантований термін не менше 500 перемикань)    |  |
| Звуковий сигнал для юстирування антени  |  |
| Максимальна довжина кабелю  | 50 м   |
| Вага  | 3,7 кг (в упаковці)                                  |
| Середній час безвідмовної роботи  | 11 років   |
| Антенa 0,77 м   |  |
| Коефіцієнт підсилення   | $G_{анд} = 44,2$ дБі<br>$G_{апм} = 40,1$ дБі         |



### 3.3 Склад обладнання Тоoway та схема його підключення

Комплект обладнання, що складається з зовнішнього елемента, що встановлюється поза приміщенням ODU (Out Door Unit) та внутрішнього елемента IDU (In Door Unit), які з'єднані коаксіальним кабелем (одним або двома). В зовнішню частину входять: спеціальна супутникова параболічна антена виробництва ViaSat, зазвичай діаметром 60–75 см, кронштейн і приймально-передавальний конвертер (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Дводіапазонна антена прийому для діапазону Ка та Ку (ODU)

Антенa ViaSat SurfBeam використовує частотно-селективний допоміжний відбивач, який дозволяє відбивати один діапазон частот, тоді як прозорість для іншого діапазону залишається. Ця функція дозволяє приймати як інтерактивні послуги в діапазоні Ка, так і ширококомвні послуги DTH (Direct-to-Home) в діапазоні Ку з одним і тим же ODU.

Офсетний рефлектор виготовляється з ударостійкого композиційного матеріалу та має гідрофобне (водовідштовхувальне) покриття. Опорно-поворотний пристрій (ОПП) кутомісно-азимутального типу, являє собою стрижневу конструкцію з профільних труб, що забезпечує більшу жорсткість антени та необхідні кути повороту.

Конструкція ОПП дозволяє монтувати антени на підлогу, стіну і, при необхідності, похилу поверхню.

Установка ODU використовує автоматизовані інструменти для спрощення юстування антени та введення в експлуатацію. Процедура установки схожа всюди в межах зони обслуговування супутникового зв'язку, а використання кругової поляризації додатково спрощує налаштування, що дозволяє скоротити час та вартість домашньої установки. Погане налаштування супутникової антени призводить до високого рівня помилок та зниження швидкості ширококутного доступу. Поточна версія Ka-Sat SurfBeam Tria (блок прийому антени) включає

звуковий тюнер, що дозволяє точно навести антену без додаткового зовнішнього обладнання

IDU – це супутниковий модем (RM4100N), що забезпечує інтерфейс Plug-and-Play Ethernet з DHCP (рис. 3.3). До супутникового модему можна підключити Wi-Fi маршрутизатор, щоб розгорнути бездротовий доступ до Інтернету в будинку.

LED індикатори на передній панелі модему інформують про стан прийому та передачі супутників (RX та TX), а також про мережеві дії.

IDU підключається до ODU за допомогою двох коаксіальних кабелів. В табл. 3.4 показані індикатори передньої панелі модема.



Рисунок 3.3 – Супутниковий модем Tooway (IDU)

При відсутності несправностей всі п'ять світлодіодів світяться блакитним кольором. Світлодіоди “LAN”, “RX” та “TX” можуть блимати в момент передачі або отримання інформації. Це є нормальним режимом роботи супутникової станції. Якщо не горять індикатори, це означає, що не подається живлення на супутниковий модем.

Перевірте підключення блоку живлення супутникового модему до електроживлення, а так само надійність включення всіх роз'ємів.

Перевірте, чи підключені всі кабелі:

- ✓ роз'єм для блоку живлення;
- ✓ роз'єм для підключення до комп'ютера;
- ✓ роз'єм для підключення ВЧ кабелю до антени.

Якщо індикатор Status (індикатор живлення) не горить, а інші індикатори блимають – необхідно звернутися в службу сервісної підтримки). При цьому необхідно повідомити свій ідентифікаційний номер станції (SAI). Він написаний на задній панелі модему. Якщо не світиться один з світлодіодів – необхідно перезавантажити модем (вимкнути живлення

модему і через 5 сек. включити знову). Якщо через 4–5 хв. усі світлодіоди загорілися, необхідно звернутися в службу технічної підтримки [14].

Таблиця 3.4

| Функції                            | Умови індикатора |  |                             |   |
|------------------------------------|------------------|--|-----------------------------|---|
|                                    | PWR              | TX   | RX                          | LAN   |
| Живлення вимкнено                  | OFF              | OFF  | OFF                         | OFF   |
| Живлення увімкнено (старт)         | ON               | OFF  | OFF                         | OFF   |
| Живлення увімкнено після запуску   | ON               | OFF  | OFF                         | ON – підключення Ethernet<br>OFF – вимкнення Ethernet |
| Процес включення                   | ON               | Повільне миготіння (періодичність 1-сек)   | OFF                         | ON – підключення Ethernet<br>OFF – вимкнення Ethernet |
| Процес сканування/реєстрації       | ON               | Повільне миготіння (періодичність 1/2-сек) | Блимає при передачі трафіка | ON – підключення Ethernet<br>OFF – вимкнення Ethernet |
| Успішна реєстрація                 | ON               | ON   | Блимає при передачі трафіка | ON – підключення Ethernet<br>OFF – вимкнення Ethernet |
| Відмова у результаті несправності. | ON               | Дуже швидке миготіння 1/8сек               | N/A                         | N/A   |

Схема підключення основного обладнання супутникового терміналу Tooway наведена на рис. 3.4.

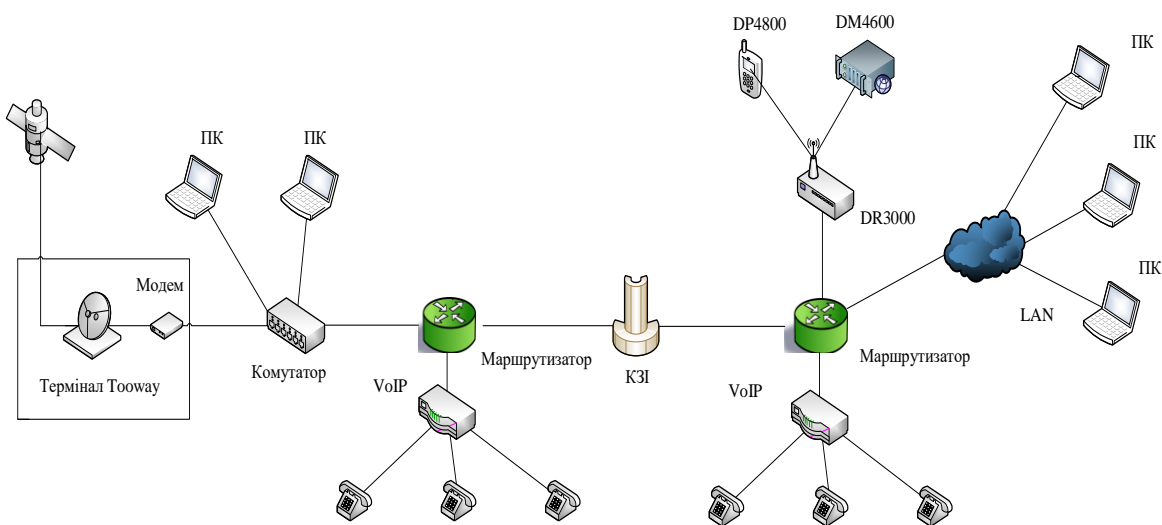


Рисунок 3.4 – Схема підключення основного обладнання супутникового терміналу Tooway

### 3.4 Можливості супутникового модему Tooway (IDU)

Основний телекомунікаційний блок (супутниковий модем RM4100N) забезпечує:

- ✓ організацію супутникового каналу зв'язку в Ka-діапазоні швидкістю до 5 Мбіт/с;
- ✓ кількість абонентів мережі відкритого телефонного зв'язку за протоколом SIP (Session Initiation Protocol) – до двох;
- ✓ кількість робочих місць локальної обчислювальної мережі – до трьох автоматизованих робочих місць;
- ✓ кодування аналогових сигналів телефонних апаратів у цифрові пакети за допомогою аудіокодеків G.711 alaw (основні) та G.729 A/B, G.723 (додаткові);
- ✓ режим маскування – VPN (Virtual Private Network) тунель, IPSec;
- ✓ підтримка протоколів динамічної маршрутизації;
- ✓ аварійне скидання налаштувань маршрутизації;
- ✓ індикація електроживлення, активності NAND (Not And) пам'яті та активності Ethernet-портів;
- ✓ електроживлення: змінний струм – 220 В;
- ✓ виконання – IP44;
- ✓ безвідмовна робота при температурі від -30°C до +50°C;
- ✓ габарити: висота – 43 (1U), ширина – 482 (19”).

### 3.5 Експлуатація терміналу супутникового зв'язку Tooway

Для забезпечення управління військами під час ведення бойових дій, у зв'язку з відсутністю власних станцій супутникового зв'язку як цивільного, так і військового призначення, широкого застосування набули термінали супутникового зв'язку Tooway.

Послідовність налаштування терміналу супутникового зв'язку Tooway умовно можна розділити на такі етапи:

- ✓ визначення номера променя покриття, кута місця (елевації), азимуту;
- ✓ збирання конструкції антени;
- ✓ вибір місця установки антени;
- ✓ юстування антени;
- ✓ налаштування модему.

### 3.5.1 Визначення номера променя покриття, кута місця (елевації), азимуту

Послуга супутникового Інтернету Tooway надається через супутник зв'язку Eutelsat Ka-Sat 9A, який розташований на геостаціонарній орбіті в позиції 9°E. Супутник зв'язку Eutelsat Ka-Sat 9A має 82 промені, через які забезпечується робота з Інтернет-з'єднанням для користувачів 26 країн Європи. Для мешканців України доступно 10 променів супутника, що забезпечує 100% покриття на всій її території (рис. 3.5).

Для визначення номера променя покриття, кута місця (елевації), азимуту, необхідно знати майбутнє місце встановлення станції супутникового зв'язку: звертаємося за посиланням <http://finder.tooway-instal.com>. Бажано мати підключення до мережі Internet.

Можливі 3 способи:

- ✓ вводимо назву міста та вулиці;
- ✓ вказуємо курсором миші на карті, як показано на рис. 3.6 (в лівому вікні на карті знаходимо своє місце положення – населений пункт, у великих містах – вулицю, робимо клік мишкою);
- ✓ вводимо GPS-координати.

Для 1 та 2 способу потрібне підключення до Internet, для 3-го – ні, але до цього хоча б 1 раз із даного комп'ютера необхідно було зайти за вказаним посиланням.

У правому вікні отримуємо необхідні дані, наприклад, для м. Донецьк: елевація – 28.25°, азимут географічний – 216.5° (азимут магнітний 216.5–7.00°=209.50°), номер променя – 1 (блакитний).

Методика розрахунку азимуту і кута місця, що використовується можна знайти на сайті Tooway, а також за допомогою інших додатків, які потребують обчислення параметрів налаштування антени земної станції супутникового зв'язку на геостаціонарний супутник. Якщо немає підключення до мережі Інтернет та супутника ПК, з якого раніше зверталися за посиланням <http://finder.tooway-instal.com>, можна провести розрахунки вручну. Результати, що дають усі способи практично однакові, але номер променя дозволяє визначити тільки спосіб через <http://finder.tooway-instal.com> (як з підключенням до Інтернету, так і без нього).

Довідково: дані для деяких міст східного регіону України зазначені в табл. 3.5



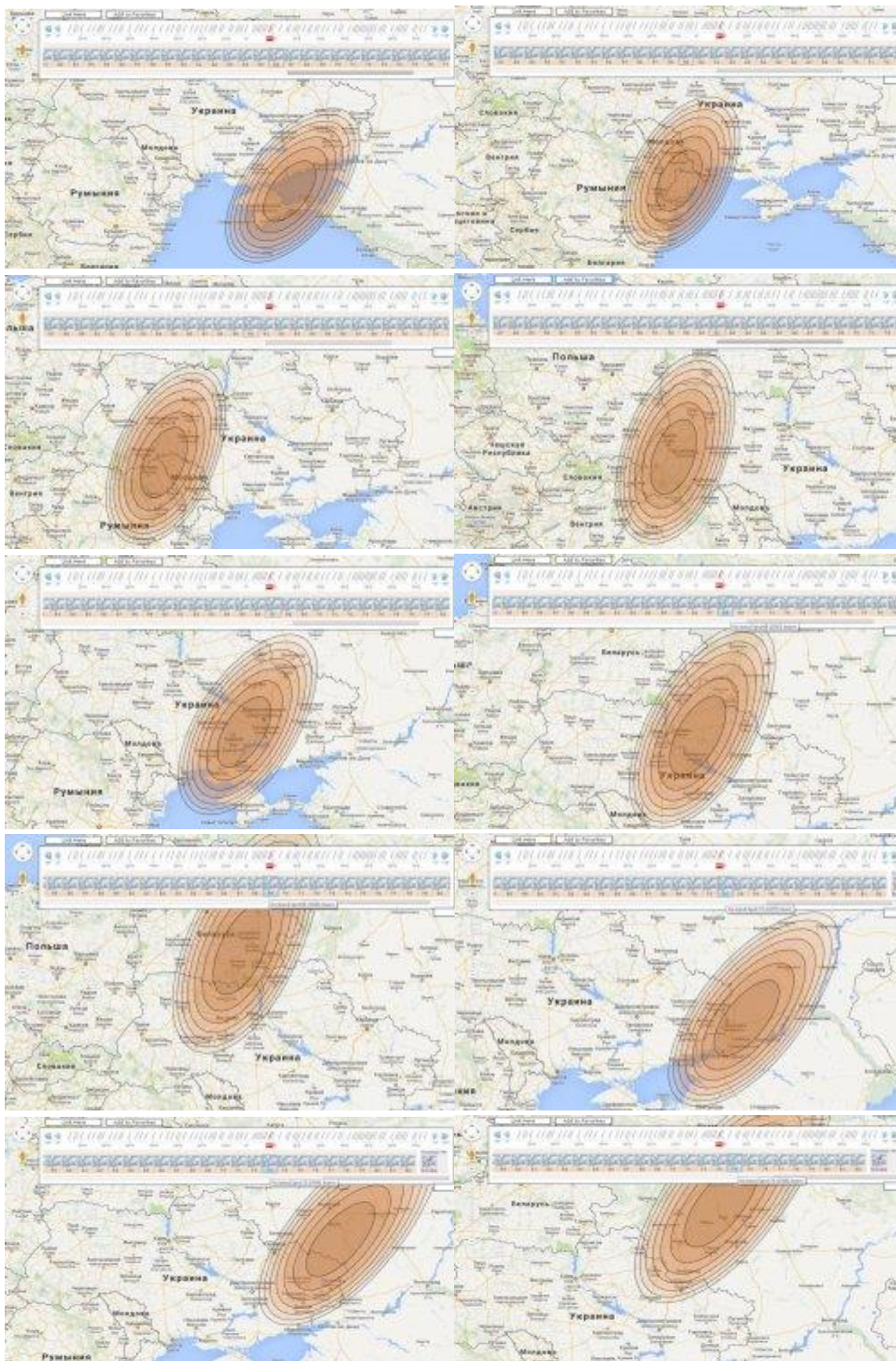


Рисунок 3.5 – Промені супутника, що забезпечують 100% покриття всієї території України

Таблиця 3.5

| Населений пункт | Довгота  | Широта   | Азимут (геогр.) | Кут місця | № променя |
|-----------------|----------|----------|-----------------|-----------|-----------|
| Луганськ        | 39,35303 | 48,53116 | 218,01          | 27,12     | 3         |
| Донецьк         | 37,83691 | 47,98992 | 216,54          | 28,24     | 1         |
| Маріуполь       | 37,55127 | 47,07012 | 216,62          | 29,16     | 1         |
| Краматорськ     | 37,63916 | 48,67645 | 216,02          | 27,73     | 4         |
| Сєвєродонецьк   | 38,47412 | 48,92250 | 216,86          | 27,16     | 4         |

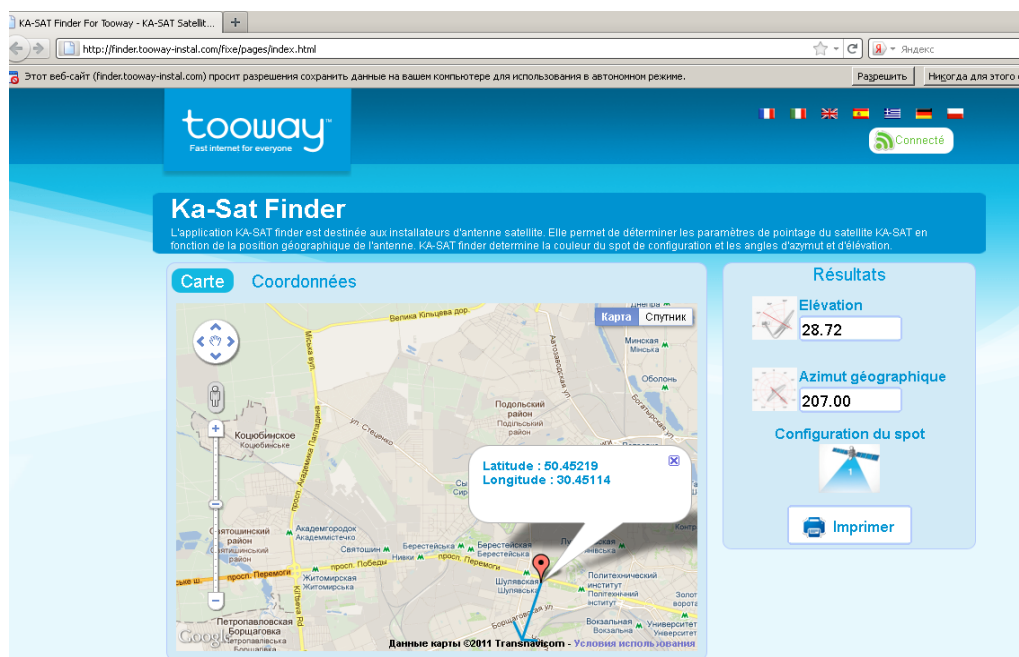


Рисунок 3.6 – Порядок визначення азимуту, кута місця та номера променя

### 3.5.2 Збирання конструкції антени

Після прибуття на місце розгортання збирається конструкція антени (рис. 3.7): диск зі стрілкою-вказівником кріпиться до платформи таким чином, щоб при фіксації опорно-поворотного пристрою (з нанесеними шкалами кута місця й азимуту) відмітка знаходилась на рівні  $90^\circ$  по азимуту; кріпимо платформу до дзеркала (рис. 3.8 а), при цьому потрібно бути обережним, щоб не деформувати дзеркало, кріпимо зовнішні хомути (рис. 3.8 б); з'єднуємо штанги з утримувачем прийомо-передавача (TRIA), під'єднуємо сам прийомо-передавач з однієї сторони та дзеркало з іншої (рис. 3.8 в,г). До прийомо-передавача під'єднуємо кабель заземлення (GND-ground).





Рисунок 3.7 – Антена з прийомо-передатчем у розібраному вигляді



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – Порядок монтажу антени з блоком прийомо-передачача

### 3.5.3 Вибір місця установки антени

За компасом визначаємо напрямок на супутник, обираємо місце встановлення так, щоб у секторі  $10^\circ$  у напрямку на супутник (як по горизонталі, так і по вертикалі) ніщо не затіняло випромінювання антени (рис. 3.9 а). Якщо є можливість, використовують існуючі конструкції (труби, щогли) для кріплення (рис. 3.8 г). Оскільки в зборі вага антени з



прийомо-передавачем складає близько 14 кг під'єднання блоку прийомо-передавача можна виконувати після фіксації антени на щоглі.

На рис. 3.9 б показано неправильний вибір місця установки опори антенної системи, на рис. 3.10 а – правильний, рис. 3.10 б – різні варіанти.

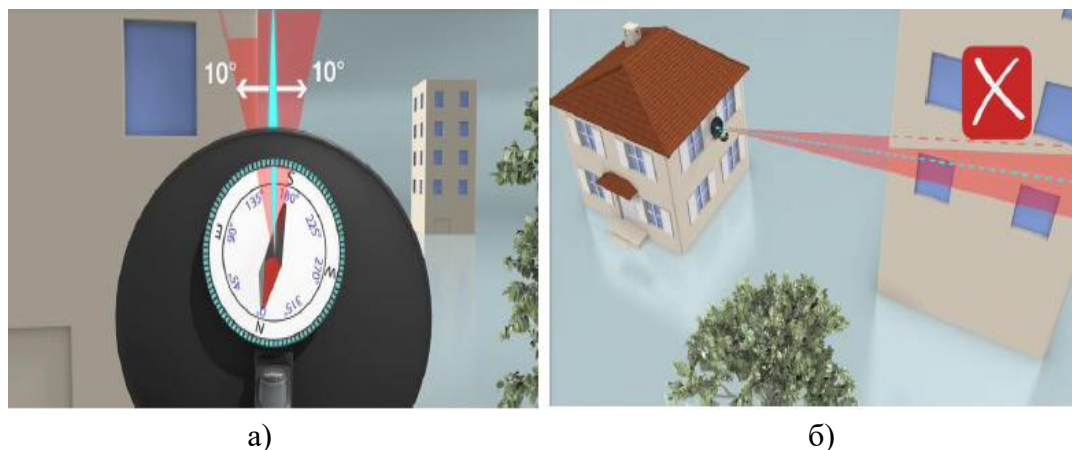


Рисунок 3.9 – Визначення напрямку на супутник

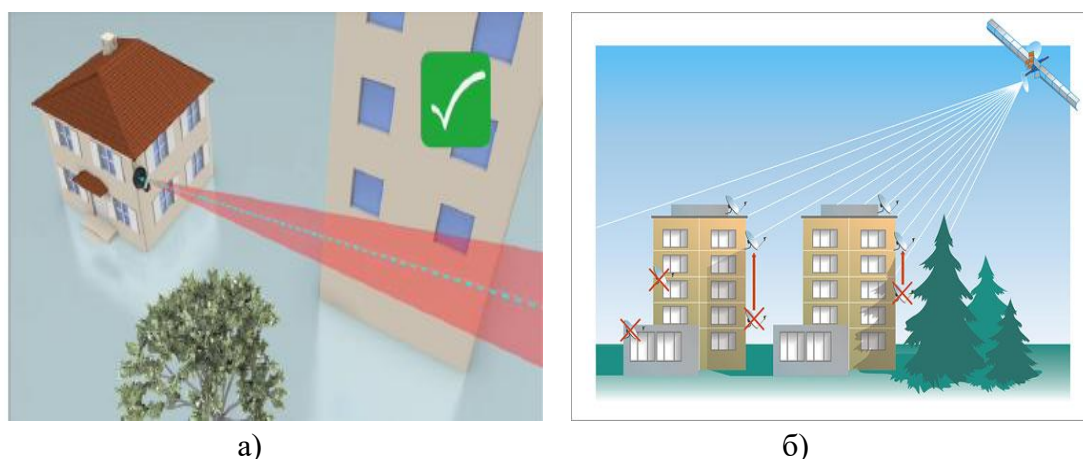


Рисунок 3.10 – Визначення напрямку на супутник

Після фіксації антенної системи до встановленої (існуючої) опори за допомогою зовнішніх хомутів (рис. 3.8 г), знаючи елевацію і азимут попередньо виставляємо значення на шкалах градування. Якщо конструкція, на яку встановлюється антена не вертикальна, для правильного встановлення антени у вертикальній площині, можна скористатися рівнем (можна попередньо заміряти відстань від верхнього (нижнього) краю дзеркала до вертикального підвісу, коли антена розміщена на строго вертикальній конструкції, і при встановленні на необхідну конструкцію підкоригувати налаштування по куту місця по даному значенню).

Значення кута місця відповідає закінченню металевої частини під шайбою фіксуючої гайки (див рис. 3.11 а).

Слід пам'ятати, що антена осесиметрична (офсетна), тому реальний кут орієнтації основного пелюстка діаграми направленості знаходиться вище, ніж напрямок орієнтації рефлектора (дзеркала) антени. Про це слід пам'ятати і при визначенні місця встановлення із забезпеченням сектора  $10^\circ$  – перешкоди, які, начебто, затіняють розкриття антени по вертикалі, насправді можуть лежати нижче основного пелюстка її діаграми направленості (див рис. 3.11 б).



Рисунок 3.11 – Попереднє виставлення азимута і кута місця

### 3.5.4 Юстування антени

З'єднуємо Tria (порт TX) з модемом коаксіальним кабелем (підходить звичайний телевізійний). Для цього заздалегідь повинен бути підготовлений кабель, з роз'ємами з обох сторін.

З'єднуємо модем з комп'ютером Ethernet-кабелем (підходить як прямий, так і cross-over). Модем Tooway має вбудовану внутрішню адресу 192.168.100.1. Тому, призначаємо персональному комп'ютеру (ПК) мережеву IP-адресу – “Отримати автоматично” (DHCP-включено), як зображено на рис. 3.12.

Для того, щоб переконатися, що між модемом і ПК можливий обмін даними, можна використовувати команду ping (Пуск – Виконати – “cmd” – ОК – “ping 192.168.100.1”).

*Примітка.* На модемі кнопку “Resets witch” не натискати, usb-порт не використовувати.

Термінал супутникового зв'язку Tooway має в наявності вбудований Web-сервер, що містить системний центр управління. Доступ до системного центру управління можна виконати, використовуючи Web-браузер Mozilla Firefox, попередньо встановлений на будь-якому персональному комп'ютері, шляхом набору в командному рядку цього броузера наступної адреси: `http://192.168.100.1` (рис. 3.13) за замовчуванням, або за істинною IP-адресою терміналу, якщо вона була попередньо змінена. У вікні броузера з'явиться головна сторінка системного центру управління. Це дозволить отримати інформацію про стан системи, її конфігурацію.

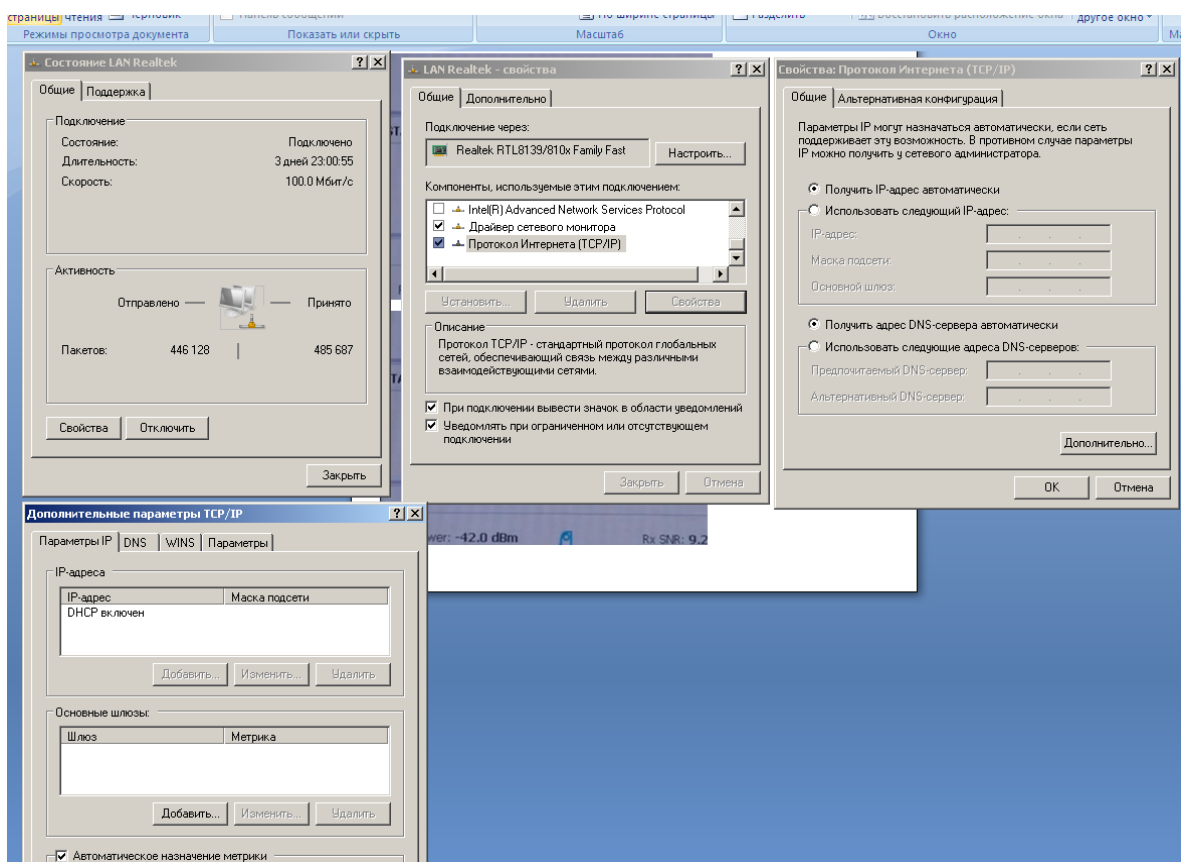


Рисунок 3.12 – мережеві налаштування ПК

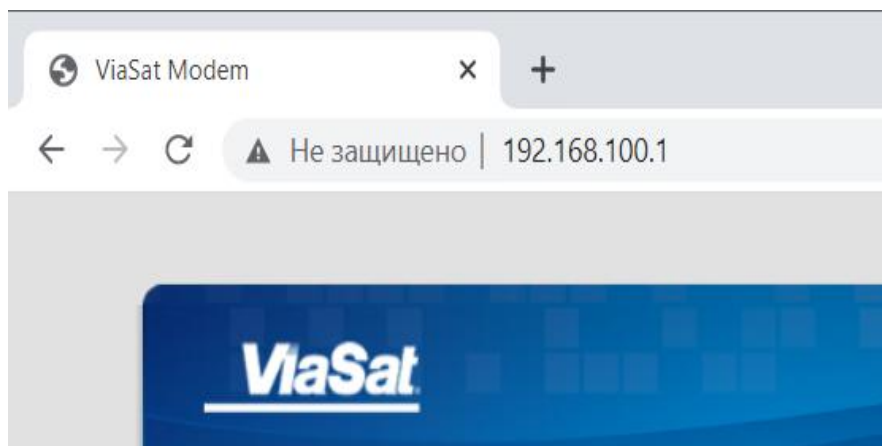


Рисунок 3.13 – Введення IP-адреси терміналу

Системний центр управління терміналу надає необхідну інформацію про стан працездатності пристрою. Отримати доступ до терміналу, окрім юстування, має сенс у випадку, якщо необхідно уточнити або змінити стан пристрою при неправильному функціонуванні терміналу, а також якщо потрібно знайти необхідну системну інформацію для конфігурування мережі або виміряти продуктивність системи.

В головній сторінці системного центру управління розташовані системні індикатори. Натискання на індикатор, викликає відповідне спливаюче вікно.

*Примітка:* індикатор стану системи (Modem State – крайній лівий на рис. 3.14) може бути жовтого або зеленого кольору.

Для переходу в режим інсталяції та підстроювання антени набираємо в командному рядку браузера адресу: <http://192.168.100.1/install>.

Вибираємо відповідний номер променя (рис. 3.15).

Настройка (юстування) антени здійснюється по звуковій сигналізації TRIA. Приєднайте кабель заземлення до щоглової скоби. Спочатку відпустивши хомути кріплення антени необхідно вручну виставити антену за відомими кутами місця (виставляється за шкалою ОПП) та азимуту (виставляється за компасом) так, щоб замість коротких подвійних гудків почали чути спочатку серія з чотирьох коротких двотональних, а потім сигнал захвату частоти – рівномірні довгі. Після цього необхідно затягнути гвинти хомутів. Далі необхідно обнулити модем (його SNR-датчик). Для цього потрібно закрити рукою (або неметалевим предметом) опромінювач (круглий отвір виходу передавача) і дочекатися 7 коротких подвійних гудків, далі Ви почуєте серію з чотирьох коротких двотональних гудків і сигнал

захвату частоти – рівномірні довгі. Далі юстувальним гвинтом по азимуту потрібно знайти напрямок, при повертанні до якого сигнал стає слабшим і нижчим за тоном. Як тільки це трапилось – почніть рух антени у протилежному напрямку, через деякий час Ви почуєте суцільний тон. На даному етапі це ще не свідчення максимального сигналу. Продовжуйте рух у цьому ж напрямку та добийтесь ослаблення, а потім поверніть рух антени знову у протилежному напрямку до захвату неперервного сигналу. Необхідно затягнути дві стопорні гайки регулювання по азимуту (вгорі та знизу) до упору. Знову обнулить модем. Виконайте ті ж операції по куту місця. Затягніть стопорні гайки кута місця.



Рисунок 3.14 – Інтерфейс системного центру управління

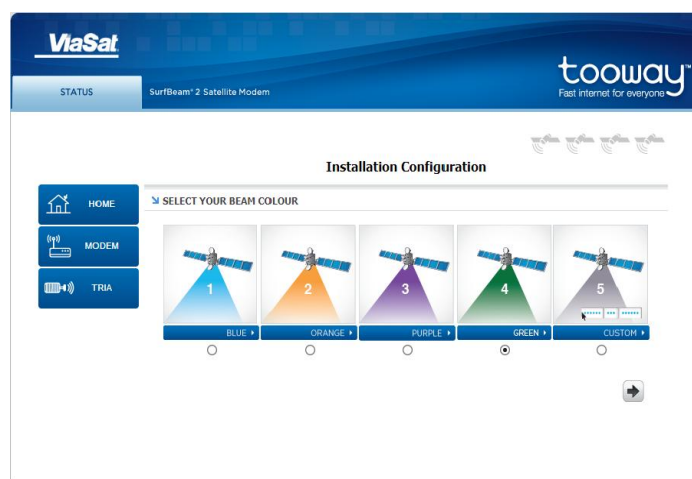


Рисунок 3.15 – Вибір необхідного променя

Вигляд екрану ПК у процесі підстроювання антени до максимального рівня прийнятого сигналу Signal Strength показано на рис. 3.16.

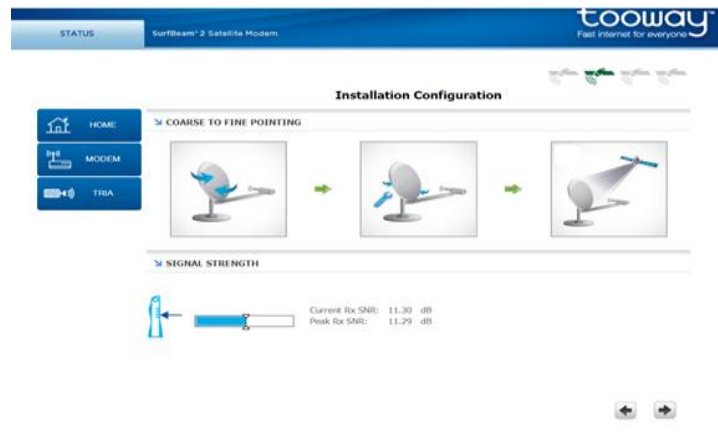


Рисунок 3.16 – Вигляд екрану ПК у процесі підстроювання антени

### 3.5.5 Налаштування модему

Після точного налаштування антени на супутник (на рис. 3.17 видно, що максимальний рівень відношення сигнал/шум – Peak RX SNR, складає 11,30 дБ, що відповідає та поточному значенню цього відношення – Current RX SNR), робимо клік мишкою на Modem State (рис. 3.18) і бачимо, як система Tooway автоматично налаштовує тракти прийому (рис. 3.19 а), передачі (рис. 3.19 б), параметри мережі й автоматично видає по DHCP адресу (рис. 3.19 в). Коли усі 4 індикатори горять зеленим (рис. 3.19 г) – станція готова до роботи.

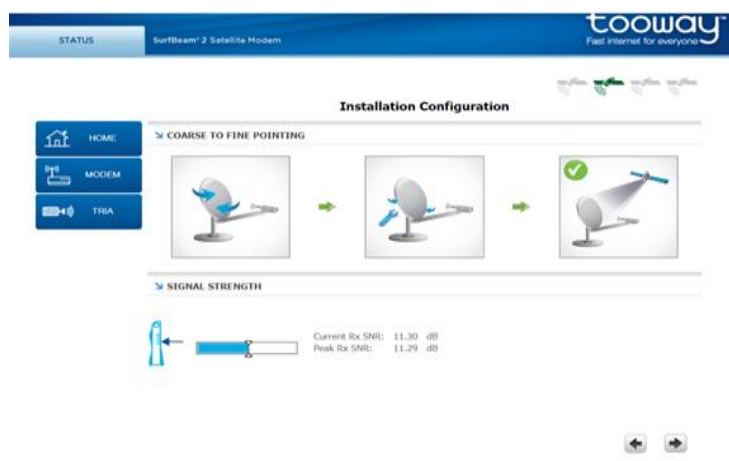


Рисунок 3.17 – Вигляд екрану ПК після юстування антени



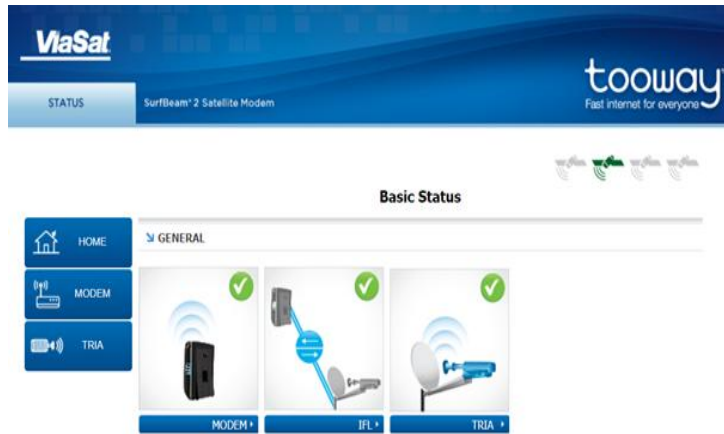
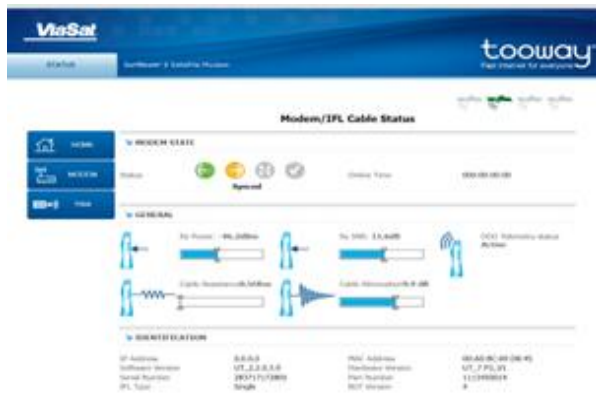
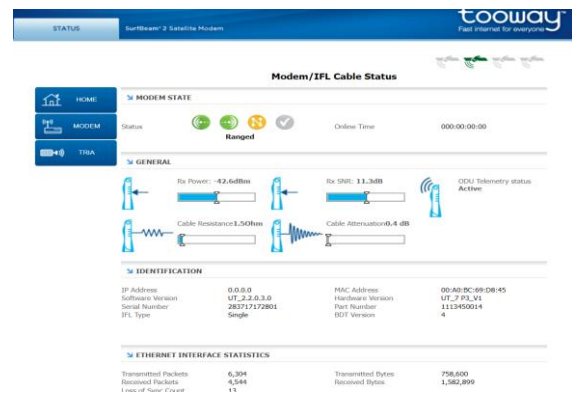


Рисунок 3.18 – Запуск автоматичного налаштування модему



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.19 – Процес автоматичного налаштування модему

### 3.5.6 Активація терміналу

Якщо включення станції відбувається вперше, необхідно активувати станцію (ввести код активації). Ця процедура може знадобитись і при зміні району дислокації, коли змінюється номер променя супутника. Для чого потрібно робити запит коду активації (узгоджувати дії з компанією “DATAGROUP”).

Для переходу на сторінку активації необхідно в адресному рядку Web-браузера ввести: ukr.net. Після цього відкривається наступне вікно (рис. 3.20).

Рекомендоване значення відношення сигнал-шум для успішної активації – не менше 9 дБ в обох напрямках (Forward Link та Return Link SNR). Якщо рівні SNR достатні – цифри відображаються зеленим кольором, незадовільні – червоним, проміжне значення – жовтим. При незадовільному SNR активація неможлива, при проміжному – може не відбутися.

Після натиснення “Enter” вводиться активаційний код (рис. 3.21).

Під час введення коду активації необхідно бути уважним, оскільки, якщо буде допущено помилку, можливе стягнення штрафу провайдером послуг.

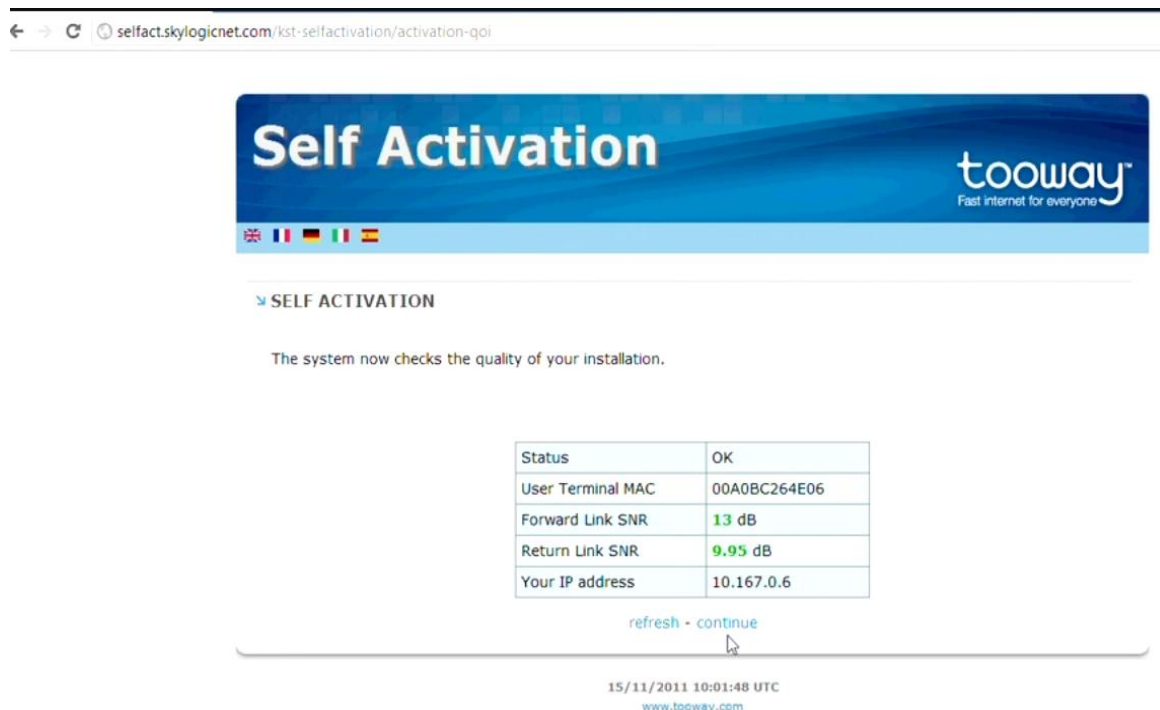


Рисунок 3.20 – Вигляд вікна активації



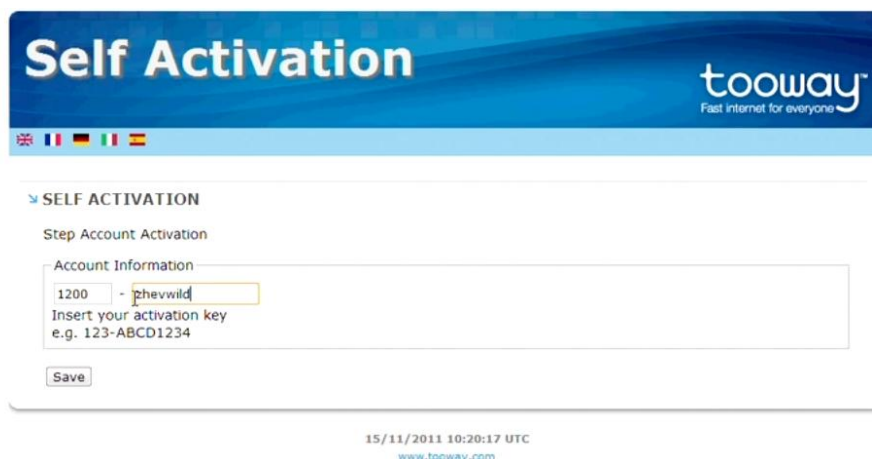


Рисунок 3.21 – Введення ключа активації

Про успішність активації свідчить вигляд вікна браузера, показаний на рис. 3.22.

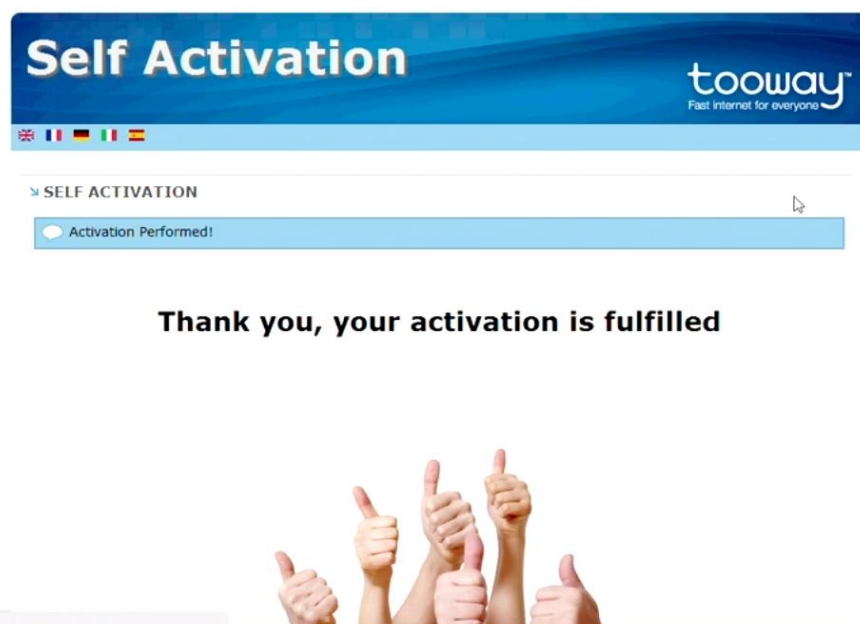


Рисунок 3.22 – Успішне завершення активації

Активация модему буде завершена після перезавантаження (вимкнення його живлення та увімкнення).

Іноді при недостатньому відношенні сигнал-шум у каналі зв'язку “вниз” (Return Link SNR), вигляд вікна, що показаний на рис. 3.22, можна і не побачити [15].

Для перевірки успішності активації необхідно ввести 10.0.0.5.

### 3.6 Глобальна супутникова система Starlink

Starlink – проєкт американської компанії SpaceX щодо розробки високопродуктивної супутникової платформи для виготовлення супутників зв'язку та запусків великої їх кількості (сузір'я) у космос (рис. 3.23). Система надає доступ до широкосмугового Інтернету у будь-якій точці планети. Першою компанія почала обслуговувати Канаду та США у 2020 році.

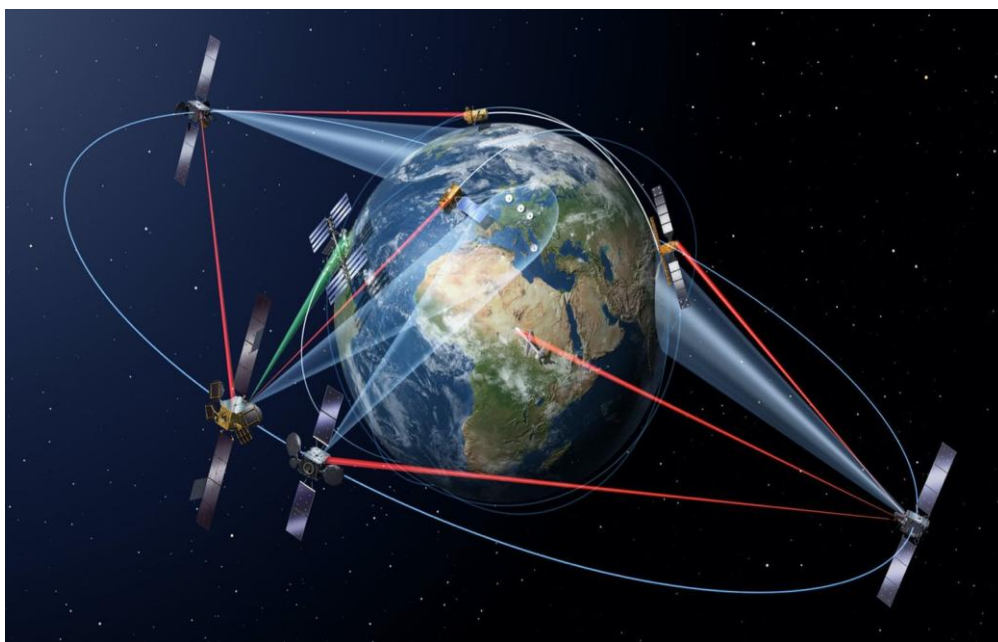


Рисунок 3.23 – Супутникова система Starlink

Назва “Starlink” взята із роману Джона Гріна “Провина зірок”. Проєкт почався у 2015 році, а перші два супутники було запусчено у тестовий політ 22 лютого 2018 року ракетою Falcon 9. Запуск наступної партії сателітів вже із 60-ти одиниць відбувся у травні 2019 року. У січні 2020 року SpaceX стала власницею найбільшої кількості супутників на орбіті (180 штук). До середини 2020-х років компанія планувала відправити на певні орбіти близько 12 тисяч апаратів, однак у 2019 році з’явилася інформація про заявку на ще 30 тисяч штук.

Отже, Starlink – це глобальна супутникова система, що розгортається компанією SpaceX для забезпечення високошвидкісного широкосмугового супутникового доступу в Інтернет у місцях, де він був ненадійним, дорогим або повністю недоступним.

Угрупування Starlink компанії SpaceX складається з двох окремих супутникових мереж.

Перша мережа повинна складатися з 4425 супутників Ku- та Ka-діапазонів. Робоча орбіта супутників до 550 км.

Ku-діапазон – діапазон частот сантиметрових довжин хвиль, що використовуються в супутниковому телебаченні. За визначенням IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), цей діапазон простягається від 12 до 18 ГГц електромагнітного спектра (довжини хвиль від 2,5 до 1,67 см). У супутниковому зв'язку до цього діапазону також відносять частину X-діапазону: у цьому випадку діапазон Ku- лежить між 10,7 та 18 ГГц. Його назва походить від виразу *Kurzunten* – буквально “короткий-нижній”, що позначає смугу нижче K-діапазону (з нім. *Kurz* – “короткого”).

Ka-діапазон – діапазон частот сантиметрових та міліметрових довжин хвиль, що використовуються в основному для супутникового радіозв'язку та радіолокації. За визначенням IEEE цей діапазон простягається від 26,5 до 40 ГГц електромагнітного спектру (що відповідає довжинам хвиль від 1,13 до 0,75 см). Назва діапазону походить від суміші англійського та німецького слів: “короткий” (нім. *kurz*) і “над” (англ. *above*), що вказує на положення Ka-діапазону: “над” K-діапазоном (18–26,5 ГГц).

Згідно з наведеними SpaceX даними, 57% людей на Землі перебувають off-line. Це відбувається із багатьох причин, але основна з них – відсутність доступу до Інтернету. Поява комунікаційної супутникової мережі від SpaceX була офіційно анонсована у січні 2015 року. Її прогнозована пропускна здатність становила 50% усього Інтернет-трафіку та 10% – у великих, густонаселених містах.

Місце, де виготовлятимуться супутники, знаходиться у м. Редмонд. Воно складається з двох об'єктів, площею 2,8 і 3,8 тис. м<sup>2</sup>. Спочатку для роботи там найняли 60 працівників, із запланованим збільшенням їх кількості до 1 тис. чоловік протягом кількох років.

У липні 2016 року SpaceX придбала територію у 740 м<sup>2</sup> у м. Ірвайн, Каліфорнія (Orange County). Зі списку вакансій для цього офісу можна було зрозуміти, що там займатимуться цифровою обробкою сигналів, радіочастотними мікросхемами та інтегральних схем для конкретного застосування ASIC (Application Specific Integrated Circuit) для супутників.

У листопаді 2016 року було подано заявку до Федеральної комісії зі зв'язку (ФКЗ) США щодо системи супутників у Fixed-Satellite Service, що використовуватимуться у діапазонах частот Ku та Ka.

У березні 2017 року компанія поділилася планами сформувати сузір'я супутників “V-діапазону, що знаходитимуться на не-геосинхронних орбітах для надання послуг зв'язку” в електромагнітному спектрі, котрий раніше не був “широко застосований для комерційних комунікаційних послуг”. Воно називатиметься “Сузір'ям V-діапазону ННО” (англ. VLEO) і міститиме 7518 супутників, які слідуватимуть за раніше заявленими 4425 супутниками, що функціонуватимуть у Ku та Ka-діапазоні. Більша група (7518) буде виведена на орбіту з висотою 340 км, а менша (4425) – працюватиме на висоті 550 та 1200 км.

У 2015–2017 роках виникли деякі проблеми з ліцензуванням спектру обслуговування. У 2017 році SpaceX подала документи, прагнучи зареєструвати назву “Starlink” для свого сузір'я супутників. Також наприкінці 2017 року вони оприлюднили свій план щодо боротьби зі збільшення кількості космічного сміття, адже зараз на орбіті перебуває приблизно 4300 діючих та вже недіючих супутників. Згідно з ним, супутники із сузір'я Starlink, які відслужать свій термін експлуатації, будуть самостійно сходити з орбіти, використовуючи власні рушії та керовано спускатися у атмосфері. Це відбуватиметься протягом року від моменту закінчення терміну їх використання (5–7 років). У випадку виходу з ладу системи власних рушіїв супутника, висота орбіти (приблизно 550 км) дозволить йому потрапити у щільні шари атмосфери протягом 1–5 років та згоріти там, не залишаючи сміття на навколосемній орбіті. На відміну від інших супутників, які перебувають на значно вищих орбітах, і потраплять у щільні шари атмосфери протягом сотень чи тисяч років після закінчення терміну експлуатації.

У березні 2018 року Федеральна комісія із зв'язку США схвалила запуск 4425 супутників. Згідно з ліцензією, компанія повинна запустити хоча б половину з них протягом 6 років. У серпні SpaceX отримала американський та міжнародний патенти на дизайн фазованої антени, що необхідна для прийому користувачем сигналу із космосу. Це лише третій патент, на який претендувала компанія за весь час свого існування, то, вочевидь, ця антена має дуже велике значення.

У жовтні 2019 року, Маск написав у Twitter: “Надсилаю цей твіт через космос за допомогою супутника Starlink... Це спрацювало!!”. Тоді ж стало відомо, що ФКЗ США на прохання SpaceX направила заявку до Міжнародного союзу електрозв'язку щодо збільшення сузір'я ще на 30 тис. одиниць. Вони працюватимуть на висоті 328–550 км.

У жовтні 2020 року SpaceX підписала угоду на \$149 млн. з Агенством космічних розробок на поставку восени наступного року чотирьох сателітів, що виготовлятимуться на базі Starlink. Завдяки інфрачервоному датчику супутники виявлятимуть і відстежуватимуть ворожі балістичні та гіперзвукові ракети.

У серпні 2021 року грузинська делегація в США домовилася про співпрацю зі SpaceX, завдяки чому в країні однієї з перших почне працювати пілотний доступ до супутникового Інтернету.

13 листопада 2021 року ракета-носій Falcon 9 успішно вивела на орбіту партію з 53 міні-супутників, призначених для продовження розгортання глобальної мережі Інтернет-покриття системи Starlink.

7 січня 2022 року в системі стався глобальний збій, що тривав близько 90 хвилин. Невдовзі після запуску 3 лютого 2022 року та виконання перших тестових маневрів, 40 із 49 супутників пошкодила потужна геомагнітна буря. Вони поступово сходять із орбіти і згорять в атмосфері Землі протягом найближчого часу.

17 червня 2022 року тяжка ракета-носій Falcon 9 успішно вивела на орбіту партію з 53 міні-супутників для глобальної мережі Інтернет-покриття системи Starlink.

### **3.6.1 Технічні характеристики супутникової системи Starlink**

Супутники, завдяки застосуванню платформи, виробляються серійно (~120 штук на місяць), тому коштують значно менше подібних, але випущених в одиничній версії. Вони належать до класу малих і важать ~260 кг. На відміну від більш поширених наразі кубічних сателітів, мають значно плоскішу форму та є стійкішими до пошкоджень. Це дозволяє поміщати їх велику кількість (60 шт.) всередині ракети та здійснювати їх від'єднання у космосі без наявності спеціального механізму для кожного із них. Замість двох стандартних сонячних панелей Starlink має одну велику, потужністю 3 кВт. Використовуючи іонний двигун на криптоні, кожен апарат здатен маневрувати, облітаючи космічне сміття, а після закінчення терміну служби спеціально сходити з орбіти і згорати в атмосфері, щоб самому не засмічувати простір. Застосування криптону, а не ксенону здешевлює кожен супутник на ~\$50 тис. Точне визначення



місяця перебування всіх сателітів допомагатиме визначати навігаційна система відстеження зірок.

Відповідно документам, поданим до Федеральної комісії зі зв'язку США, супутники у космосі спілкуватимуться між собою на частоті понад 10 ГГц за допомогою лазерного променя. Із наземними станціями та терміналами користувачів зв'язок здійснюватиметься у радіо (Ku-та Ka-) діапазонах на частоті 12 ГГц. Ku-антени більш надійні у роботі навіть у хмарну та дощову погоду, а Ka-антени забезпечують значно більшу пропускну здатність.

Обіцяна швидкість передачі даних – 1 Гбіт/с для кожного споживача. Щоразу запуск 60 супутників може забезпечити 1 терабіт пропускну здатності, що потенційно може підтримувати 40 000 користувачів, які одночасно передають контент високої якості. Зазвичай зв'язок із геостационарним супутником має мінімальну кругову затримку сигналу (туди-назад) у 239 мс, але іноді вона може сягати і 600 мс. Супутники Starlink будуть обертатися на висоті в 1/30 цієї відстані, тому затримка сигналу становитиме лише 25-30 мс, що еквівалентно з кабельним або оптоволоконним зв'язком. SpaceX навіть намагається досягти величини у 10 мс. Система використовуватиме протокол peer-to-peer.

Початково планувалося, що супутники першої фази виводитимуть на висоту 1100–1300 км, однак у квітні 2021 компанія отримала дозвіл розмістити їх на 550 км.

В табл. 3.6 приведено кількісні характеристики сузір'я, а на рис. 3.24 показано їх розміщення.

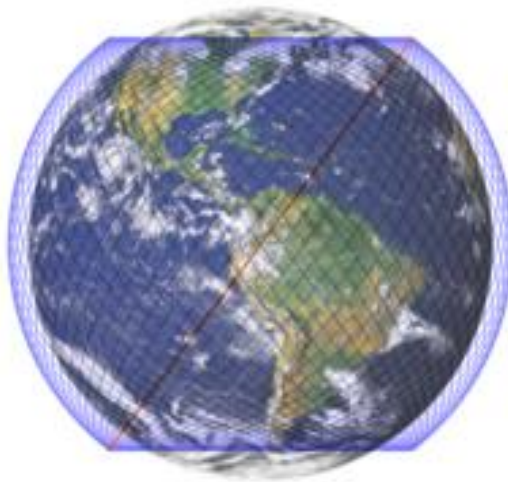


Рисунок 3.24 – Супутники Starlink на 72 орбітах по 22 у кожній, всього 1584 одиниці

Першими були запущені два прототипи, що спочатку називалися “MicroSat”, а потім були перейменовані у “Tintin”. Завдяки оснащенню камерами вони могли фільмувати Землю. Для зв'язку із ними у будівлях, що знаходяться у власності SpaceX та Tesla Inc. у Каліфорнії, Техасі та Вашингтоні, розмістили стаціонарні станції прийому. Також застосовувалися три мобільні комунікатори у фургоні. Такий зв'язок здійснювався щодня протягом 10 хвилин. Також існує інформація, що SpaceX домовилася про тестування сигналу високошвидкісного Інтернету в таких країнах як Аргентина, Норвегія та Нова Зеландія. Навесні 2020 року запустили процес їхньої деорбітації.

Таблиця 3.6

| Фаза   | Група № | Орбіта, км. | Нахил орбіти, град. | Запланована кількість супутників | Термін до запуску половини супутників | Термін до запуску всіх супутників | Запущено/ працюють/ знищено |
|--|---------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Загальна кількість запущених супутників Starlink усіх версій (березень 2022 року) – 2282 (з них: працюють – 2039, деорбітують/знищені – 243) |         |             |                     |                                  |                                       |                                   |                             |
| 1  |         | 550         | 53                  | 1584                             | березень 2024                         | березень 2024                     | 1727                        |
|  | 4       | 540         | 53,2                | 1584                             |                                       |                                   | 491                         |
|  | 2       | 570         | 70                  | 720                              |                                       |                                   | 51                          |
|  |         | 560         | 97,6                | 508                              |                                       |                                   | 13                          |
| 2  |         | 335,9       | 42                  | 2493                             | листопад 2024                         | листопад 2024                     |                             |
|  |         | 340,8       | 48                  | 2478                             |                                       |                                   |                             |
|  |         | 345,6       | 53                  | 2547                             |                                       |                                   |                             |

**Starlink v0.9 (тестова версія)**

- ✓ маса – 227 кг;
- ✓ наявні антени, що працюють у Ku-діапазоні;
- ✓ 95 % деталей цих супутників на кінець терміну придатності згорять у атмосфері.

**Starlink v1.0**

- ✓ маса – 260 кг;
- ✓ додані Ka-антени;
- ✓ на один супутник “DarkSat”, що запустили у січні 2020 року, нанесене спеціальне покриття для зменшення альбедо;
- ✓ 100 % деталей супутників на кінець терміну придатності згорять у атмосфері.

### Starlink v1.5

✓ матимуть обладнання для передачі одне одному інформації за допомогою лазерного променя. Супутники з лазерним типом передачі даних призначені насамперед для покриття Інтернетом приполярних територій (наприклад, на Алясці). Такі апарати оснащено лазерними передавачами, що мають підвищити швидкість і стабільність сигналу.

### 3.6.2 Користувацькі термінали та наземні станції супутникової системи Starlink

На відміну від супутникового зв'язку через Iridium Satellite Constellation, сигнал від якого подається безпосередньо у телефон, система Starlink потребуватиме додаткового терміналу (супутникової тарілки із роутером), що відстежуватиме супутники за допомогою фазованої антенної решітки, яку рухатиме вбудований моторчик (рис. 3.25). Встановлювати його потрібно, спрямувавши у небо.



Рисунок 3.25 – Користувальний термінал з антеною першого покоління

У березні 2020 року SpaceX отримала дозвіл від Федеральної комісії зі зв'язку США на встановлення 1 млн. своїх наземних антен розміром 48 см, що дозволить розповсюдити саме цю кількість користувацьких терміналів. Спочатку розпочалися випробування їх роботи серед працівників SpaceX, а у жовтні стартувало бета-тестування. Воно розпочалося після виведення на орбіту 840 супутників. Перші неофіційні дані від тестувальників виявилися наступними:



- ✓ затримка сигналу складає 20–94 мс;
- ✓ швидкість завантаження 11–60 Мбіт/с;
- ✓ швидкість відправлення даних 5–18 Мбіт/с.

Для безпосереднього під'єднання до всесвітньої мережі SpaceX потребує встановлення сотень наземних станцій обробки даних. Але ця кількість є незначною завдяки наявності багатьох супутників. Адже вони у випадку відсутності поблизу від користувача такої станції за допомогою лазера швидко передаватимуть одне одному інформацію, аж поки якийсь із супутників зможе “побачити” необхідну станцію. І саме це потрібно для малозаселених територій.

Термінал Starlink-2 є наземним елементом глобальної супутникової системи Starlink і служить для підключення до Інтернету бездротовим способом термінального обладнання користувачів.

Тактико-технічні характеристики терміналу Starlink-2 приведені в табл. 3.7, а характеристики Wi-Fi роутера в табл. 3.8.

Таблиця 3.7

| Габарити                    | Прямокутник 50 x 30 см |
|-----------------------------|------------------------|
| Вага                        | 4,2 кг                 |
| Висота у робочому положенні | 61 см                  |
| Діаметр стійки кріплення    | 3,4 см                 |
| Діапазон робочих температур | -30°C ... +50°C        |
| Захист за стандартом        | IP54                   |

Таблиця 3.8

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Стандарт Wi-Fi              | IEEE 802.11 a/b/n/ac  |
| Робоча частота              | Два діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц  |
| Стандарт шифрування         | WPA2 та WPA3 (Wi-Fi Protected Access)                                     |
| Порт Ethernet               | Ні  |
| Діапазон робочих температур | -30°C ... +50°C   |
| Захист за стандартом        | IP54  |
| Технологія маршрутизації    | 3×3 MU-MIMO (розраховане на багато MIMO) (Multiple Input Multiple Output) |

Швидкість передачі може коливатися від 8 Мбіт/с до 200 Мбіт/с та від 500 Мбіт/с. Затримки передачі сигналу – від 15 до 40 мс. Живлення від мережі змінного струму  $U=220$  В. Потужність 25–30 Вт. Кут сканування антени +/-50°. Антена “бачитиме” один супутник в інтервалі приблизно від 3 до 5 хвилин, після чого відбувається перемикання на наступний апарат.

Зона покриття знаходиться у радіусі приблизно 900 кілометрів навколо наземних хабів.

Склад комплекта поставки:

ODU (Out Door Unit) – зовнішній елемент, що встановлюється поза приміщенням/кабіною;

IDU (In Door Unit) – внутрішній елемент, що встановлюється у приміщенні/кабіні;  
кабелі.

*Зовнішній елемент (ODU)* – це антена на монтажному стативі з фазованими ґратами, що знаходиться під захисним радіопрозорим ковпаком прямокутної форми. У середині корпусу антени знаходиться LNA (Low-Noise Amplifier) – підсилювач, що працює із сигналом дуже малої потужності.

*Внутрішній елемент (IDU)* – Wi-Fi роутер із блоком живлення, а також, за необхідності, можна використовувати перехідник для підключення термінального обладнання користувачів через вихід RG-45.

*Особливості експлуатації.*

Керується система через програму в смартфоні (рис. 3.26). Антену слід встановити надворі так, щоб вона не була закритою, а була спрямованою в небо. Ідеальні показники швидкості та стабільності сигналу досягаються в умовах сприятливої погоди та відсутності густих хмар (рис. 3.27).

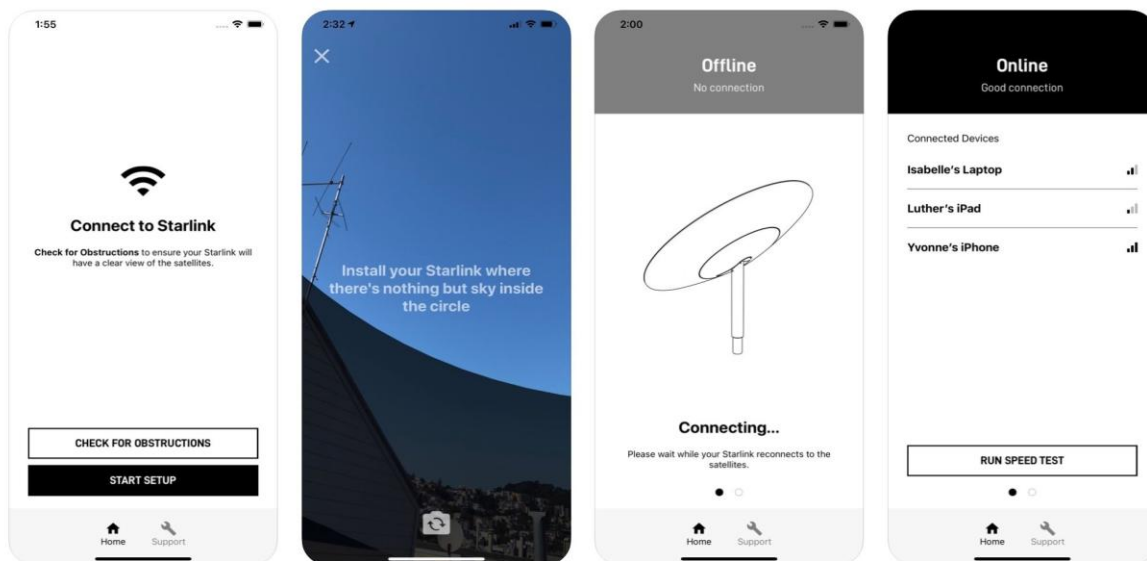


Рисунок 3.26 – Програмне забезпечення для керування терміналом Starlink

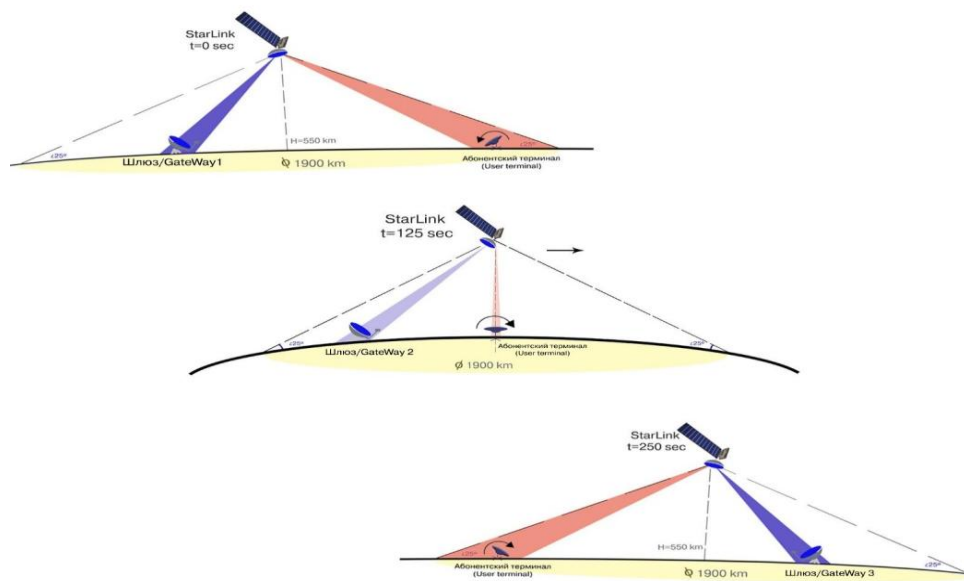


Рисунок 3.27 – Юстування антени Starlink

При температурі вище  $50^{\circ}\text{C}$  антени відключаються. Необхідно використовувати будь-яку можливу конструкцію для захисту від прямого сонячного проміння.

Потрібно пам'ятати, що у всіх терміналах вбудовані датчики GPS. На серверах глобальної супутникової системи Starlink зберігаються координати всіх терміналів.

При розгортанні антени необхідно забезпечити пряму видимість на  $100^{\circ}$  щодо центру антени (див. рис. 3.28)

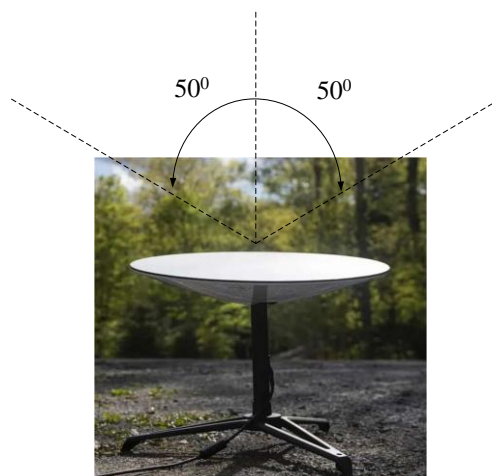


Рисунок 3.28 – Приклад розміщення антени Starlink з метою забезпечення прямої видимості на  $100^{\circ}$  щодо центру антени

### 3.7 Система персонального супутникового зв'язку Thuraya

У квітні 1997 року 18 фундаторів, відомі телекомунікаційні оператори та інвестиційні фірми, заснували приватну акціонерну компанію Thuraya Satellite Telecommunications (TST) зі штаб-квартирою в Абу-Дабі, Об'єднані Арабські Емірати (ОАЕ). Через рік TST підписала з фірмою Hughes Space and Communications (тепер Boeing Satellite Systems Incorporation) контракт вартістю \$960 млн. на створення двох супутників (їх запуск, страхування), кількох земних станцій та 235 тис. мобільних телефонів для користувачів. Комерційна експлуатація системи Thuraya почалася у травні 2001 році після завершення її випробувань і залучення 10 тис. абонентів.

Спочатку система Thuraya обслуговувала 45 країн Середнього Сходу, Центральної Азії, Індії та Північної Африки. Після запуску в 2008 році третього супутника кількість країн, що обслуговуються, зросла до 140, а зона покриття розширилася на територію Австралії, Азії та більшої частини Африки.

Зв'язок абонентів системи здійснюється мобільними телефонами, таксофонами і терміналами морських суден.

*Особливості системи супутникового зв'язку Thuraya:*

- ✓ супутники системи розташовані на геостаціонарній орбіті;
- ✓ у системі використовуються мобільні абонентські термінали;
- ✓ оптимізована маршрутизація дзвінків знижує вартість дзвінка;
- ✓ виклик у мережі здійснюється без станції сполучення в будь-якій точці зони обслуговування;
- ✓ доступ до мережі та вартість дзвінка залежать від місця знаходження абонента;
- ✓ визначення країни та меж зони дії сервіс-провайдерів здійснюється автоматично навігаційною системою GPS.

На рис. 3.29 білою лінією позначена зона обслуговування системи з гарантованою якістю. Блакитною лінією – зона покриття, у її межах якість зв'язку може залежати від метеорологічних умов.

Послуги системи Thuraya: голосовий зв'язок; передача даних у режимі Dial-Up; пакетна передача даних GmPRS; факсимільний зв'язок; передавання коротких повідомлень; визначення географічного місця розташування абонента; передавання екстрених повідомлень SOS.

*Космічний сегмент, характеристика космічного апарату*

Космічний сегмент системи Thuraya складається з трьох супутників на геостаціонарній орбіті. Вони створені компанією Boeing Satellite Systems і виведені на орбіту ракетами-носіями Zenit-3SL із плавучої стартової платформи “Одісей”. Термін служби супутників розрахований на 12...15 років.

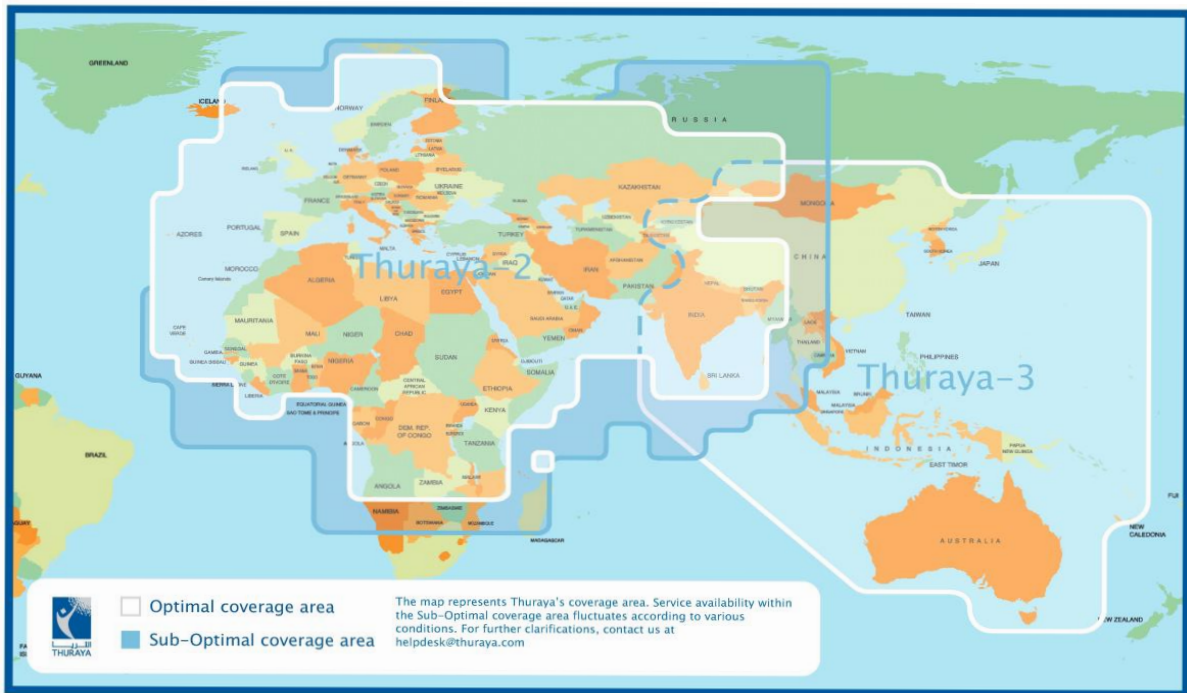


Рисунок 3.29 – Зони покриття та обслуговування системи супутникового зв'язку Thuraya з гарантованою якістю

У табл. 3.9 наведено орбітальні параметри супутників системи Thuraya і частоти радіоліній. На рис. 3.30 зображено розташування одного із супутників відносно Землі.

Кожен супутник оснащений великогабаритною багатопроменевою антеною L-діапазону. Її рефлектор у формі еліпса (див. рис. 3.31) розміром  $12,25 \times 16$  м, виготовлений з легкого та міцного теплостійкого графіто-композитного матеріалу. Завдяки трубчастій конструкції із шарнірно-тросовими зчленуваннями, рефлектор перед запуском супутника згортається в компактний пакет діаметром 1,3 м і висотою 3,8 м (див. рис. 3.32). Після виведення супутника на орбіту пакет розгортається в плоску антенну решітку за допомогою стисненого газу, що заповнює тороїдальний балон з

еластичного кевлароподібного матеріалу. Друга, параболічна дзеркальна антена супутника діаметром 1,27 м, працює у С-діапазоні.

Таблиця 3.9

| Супутники Thuraya | Орбітальна точка, дата запуску   | Кут нахилу до геостационарної орбіти – 6,3°                 | Абонентська лінія (L-діапазон):            | Фідерна лінія (С-діапазон):                |
|-------------------|--|---|--|--|
| Thuraya-1         | Орбітальна точка стояння – 44,0 E.<br>З 09.10.2007 перебуває в резерві, у точці 122,5 E.<br>Запущений 21.10.2000 | Маса супутника перед запуском – 5 250 кг.                   | Земля-Супутник<br>1626,5...<br>1660,5 МГц, | Земля-Супутник<br>6425,0...<br>6725,0 МГц, |
| Thuraya-2         | Орбітальна точка стояння – 28,5 E.<br>Запущений 10.07.2003   | Маса супутника на орбіті (початок експлуатації) – 3 200 кг. | Супутник-Земля<br>1525,0...<br>1559,0 МГц. | Супутник-Земля<br>3400,0...<br>3625,0 МГц. |
| Thuraya-3         | Орбітальна точка стояння – 98,5 E.<br>Запущений 15.01.2008   |   |  |  |

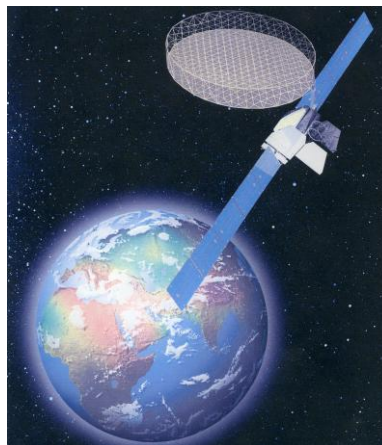


Рисунок 3.30 – Розташування супутника Thuraya відносно Землі

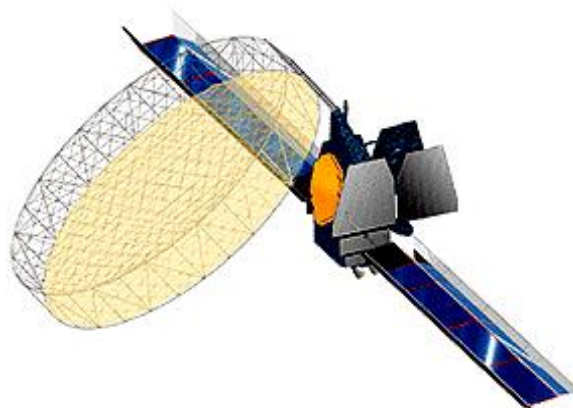


Рисунок 3.31 – Супутник Thuraya з великогабаритною багатопроменевою антеною L-діапазону



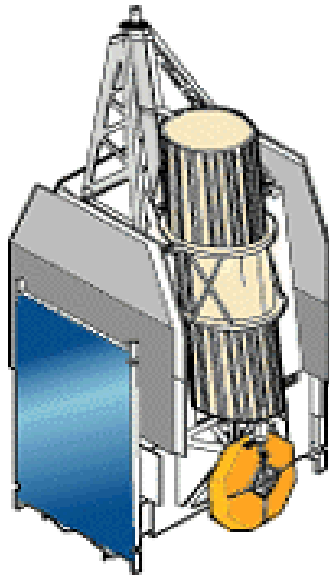


Рисунок 3.32 – Супутник Thuraya у згорнутому вигляді

*Підсистема корисного навантаження супутника Thuraya містить у собі:*

– систему утворення променів, яка може змінювати конфігурацію зони покриття шляхом зміни їх ширини або кількості; концентрувати промені в районах максимальної активності зв'язку, збільшуючи їхню пропускну спроможність у даному регіоні; використовувати до 20 % загальної потужності у окремих променях. Окремі промені можуть бути вимкнені оператором;

– бортовий цифровий сигнальний процесор DSP (Digital Signal Processor), який перерозподіляє потужність і смугу частот сигналів по променях для підвищення ефективності використання частотного ресурсу та організації зв'язку “абонент-абонент”. Цей процесор (спроектований фахівцями Boeing Satellite Systems і виготовлений корпорацією IBM) – самий потужний у світі серед експлуатованих на супутниках.

Ключовим компонентом процесора є інтегральні схеми високої щільності ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Вони містять до 3,8 млн. логічних елементів кожна. Виконані за 0,18-мікронною технологією ASIC класу SA-12 мають п'ятишарове розведення 0,25-мікронними провідниками та 50-пікосекундну затримку сигналів у логічному елементі при його питомій розсіюваній потужності 0,1 мкВт/МГц.

Крім цифрового формування адаптивної багатопроменевої діаграми спрямованості, процесор виділяє канали зі змінною смугою пропускання, кодує і декодує сигнали при FDMA/TDMA, здійснює їхню квадратурно-



фазову маніпуляцію (демодуляцію). Він виконує також обробку сигналів телеметрії та підтримки зв'язку по службовому каналу з наземним центром контролю працездатності супутника і регіональними станціями сполучення.

*Підсистема енергоживлення:*

– сонячні батареї, розміщені на 2-х “крилах”. Кожне “крило” складається із 4-х галій-арсенідних панелей розміром 3,75×3,75 м. Довжина батареї у складеному стані – 7,6 м, у розгорнутому – 34,5 м; потужність на початку експлуатації – 13 кВт, наприкінці – 11 кВт;

– акумулятори ємністю 250 ампер/годин.

Земний сегмент системи Thuraya складається з головної та локальних станцій сполучення. Головна станція сполучення PGW (Primary Gateway) розташована у м. Шарджа (ОАЕ) і обслуговує весь комунікаційний трафік. До складу PGW входять кілька спеціалізованих земних станцій та центр керування і контролю працездатності супутника SOC (Satellite Operations Center). Вони забезпечують обробку телеметричної інформації, що надходить від супутника по лінії С-діапазону, і контролюють функціонування всіх його підсистем. PGW з'єднується з телефонною мережею загального користування, мережею мобільного зв'язку і приватними мережами магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Локальна станція сполучення створюється, коли кількість користувачів у регіоні перевищує 40...50 тис.

У 2001 році ETSI (European Telecommunications Standards Institute) видав два стандарти – Geo Mobile Radio-1 (GMR-1) і Geo Mobile Radio-2 (GMR-2) – для регіональних супутникових систем мобільного зв'язку (з новим поколінням геостаціонарних супутників).

На основі цих стандартів створені дворежимні (GSM/GMR) термінали. Вони дають можливість здійснювати роумінг між супутниковими та наземними мережами з використанням елементів мережної інфраструктури GSM (Global System for Mobile Communications) – центрів комутації мобільного зв'язку, реєстрів переміщення, центрів обслуговування коротких повідомлень та ін. Використання у дворежимних терміналах системи Thuraya (GMR-1) стандартного модуля ідентифікації абонента (SIM) і єдиного номера телефону дає змогу з'єднуватися з користувачем незалежно від того, у якому режимі він перебуває – супутниковому чи GSM.

Перевагою мобільних абонентських терміналів Thuraya є наявність двох режимів роботи (через супутник і в мережі GSM), з автоматично керованим переходом із одного режиму на інший. Якість голосового супутникового зв'язку порівняна з якістю GSM.

Абонентські термінали Thuraya мають такі модифікації:

- ✓ стаціонарні телефонні апарати (таксофони);
- ✓ одно- і дворежимні (супутник/GSM) мобільні телефони та термінали транспортних засобів (автомобілів, морських суден).

Термінали Thuraya виготовляються компаніями Hughes Network Systems, Ascom та APsi та надають наступні сервіси (див. табл. 3.10).

Таблиця 3.10

|   |
|---|
| Thuraya IP – передача даних на швидкості 444 кбіт/с |
| Портативні термінали мають вбудований GPS-приймач   |
| Метод доступу до супутника – FDMA/TDMA              |
| Тип модуляції – $\pi/4$ QPSK                        |
| Смуга пропускання каналу – 27,7 кГц                 |
| Швидкість передачі даних – 2,4; 4,8; 9,6 кбіт/с     |

Робота абонентських терміналів у діапазонах GSM-900 і супутникового каналу (1626,5–1660,5 МГц/1525–1559 МГц) забезпечується застосуванням двочастотної чотиризахідної спіральної антени, яка перевищує за розміром антену GSM-терміналу. Абоненти Thuraya поза мережею GSM спілкуються з іншими абонентами безпосередньо через супутник, без “подвійного стрибка”, при якому груповий потік спочатку передається “вниз”, перекомутується на земних станціях сполучення і потім повертається на борт супутника.

Радіоінтерфейс GMR-1 для системи Thuraya розроблений компанією Hughes Electronics, а телефони цього стандарту виготовляються компаніями Hughes і Ascom. Стратегія розвитку GMR передбачає можливість еволюції до супутникової системи UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [16].

Зовнішній вигляд телефонів Thuraya зображений на рис. 3.33.



Рисунок 3.33 – а) Thuraya SG-2520; б) Thuraya SO-2510; в) Thuraya XT

### 3.8 Система супутникового зв'язку Inmarsat

Послуги системи супутникового зв'язку Inmarsat включають традиційні голосові дзвінки, низькорівневі системи відстеження даних, високошвидкісний Інтернет та інші послуги передачі даних, а також служби надзвичайних ситуацій та забезпечення безпеки. Широкопasmутова глобальна мережа доступу BGAN (Broadband Global Access Network) забезпечує послуги GPRS (General Packet Radio Service) на швидкості до 800 кбіт/с із затримкою 900–1100 мс через IP супутниковий модем розміром з ноутбук, тоді як мережа Global Xpress пропонує до 50 Мбіт/с із затримкою 700 мс через антени розміром лише 60 см.

Вартість дзвінка через Inmarsat наразі знизилася. Плата за голосові дзвінки однакова в будь-якому місці світу, де використовується послуга. Тарифи на дзвінки до кодів країн Inmarsat різняться залежно від країни, в якій вони розміщені. Inmarsat в основному використовує код країни 870 (див. нижче). На сьогодні послуги Inmarsat використовують IP-технологію. Окрім власних супутників, Inmarsat має угоду про співпрацю з ACeS щодо портативних голосових послуг.

#### *Глобальне покриття променями системи Inmarsat.*

Кожен супутник оснащений єдиним глобальним променем, який охоплює до третини поверхні Землі, крім полюсів. Загалом, загальне покриття променя поширюється від широти від  $-82^{\circ}$  до  $+82^{\circ}$  незалежно від довготи.

#### *Регіональне точкове покриття системи Inmarsat.*

Кожен регіональний пучок покриває частку площі, покритої глобальним променем, але в сукупності всі регіональні промені пропонують практично таке ж покриття, як і глобальні промені. Використання регіональних променів дозволяє мобільним наземним станціям працювати зі значно меншими антенами. Регіональні промені були введені із супутниками Inmarsat-3. Кожен супутник Inmarsat-3 забезпечує чотири-шість точкових променів; кожен супутник Inmarsat-4 забезпечує 19 регіональних пучків.

Вузькі промені створюють три супутники Inmarsat-4. Вузькі промені різняться за розмірами, мають, як правило, кілька сотень кілометрів. Вузькі промені, хоч і набагато менші, ніж глобальні або регіональні, проте набагато численніші і, отже, пропонують однакове глобальне покриття. Вузькі точкові промені дозволяють мати ще менші антени і значно вищі

швидкості передачі даних. Вони становлять основу портативної мережі Inmarsat GSPS (Greater Sudbury Police Service) та широкосмугових послуг BGAN. Кожен супутник Inmarsat-4 забезпечує близько 200 вузьких точкових променів.

Inmarsat Global Xpress (Inmarsat-5) забезпечує глобальне покриття за допомогою чотирьох геостаціонарних супутників. Кожний супутник підтримує 89 променів, що забезпечує загальне покриття приблизно однієї третини поверхні Землі на супутник. Крім того, доступно 6 керованих промінів на супутник, які можна переміщати, щоб забезпечити більшу пропускну здатність у вибраних місцях.

Постійний телефонний код країни для дзвінків у пункти призначення Inmarsat:

- ✓ 870 SNAC (єдиний код доступу до мережі);
- ✓ номер 870 – це автоматичний локатор; необов'язково знати, на який супутник зареєстрований термінал призначення Inmarsat. SNAC зараз використовується усіма послугами Inmarsat.

Коди країн, що були поступово скасовані 31 грудня 2008 року, були:

- ✓ 871 Регіон Атлантичного океану – Схід (AOR-E)
- ✓ 872 Регіон Тихого океану (POR)
- ✓ 873 Регіон Індійського океану (IOR)
- ✓ 874 Регіон Атлантичного океану – Захід (AOR-W)

*Послуги системи Inmarsat з високою пропускну здатністю.*

Global Xpress: З 2015 року Inmarsat пропонує послуги з високою пропускну здатністю через мережу Global Xpress. Ця послуга надає глобальну послугу на основі IP по лінії зв'язку “вниз” із швидкістю до 50 Мбіт/с і лінією зв'язку “вгору” зі швидкістю 5 Мбіт/с із затримкою 700 мс. Послуги надаються на морському, авіаційному, державному та підприємницькому ринках. Global Xpress підтримується існуючою мережею діапазонів BGAN L, а послуги пропонуються за допомогою комбінації двох мереж для підвищення доступності та надійності. У березні 2018 року Inmarsat співпрацює з Isotropic Systems для розробки повністю електронної скануючої антени, призначеної для використання з глобальною мережею Xpress.

Європейська авіаційна мережа: Inmarsat також планує пропонувати авіаційні послуги через Європейську авіаційну мережу, що розроблена у партнерстві з Deutsche Telekom. Європейська авіаційна мережа використовує наземну LTE (Long-Term Evolution) мережу та супутник

Inmarsat S-діапазону для забезпечення пропускної здатності 50 Гбіт/с для літаків у європейському повітряному просторі. Проект стикається з низкою правових та нормативних проблем.

*Розширені послуги системи Inmarsat:*

*BGAN:* широкопasmова глобальна мережа для використання на суші. BGAN використовує супутники Inmarsat -4, щоб запропонувати спільну IP-послугу з комутацією пакетів IP до 800 кбіт/с (швидкість висхідної та низхідної лінії зв'язку можуть відрізнятися і залежить від моделі терміналу) та послугу потокового IP від 32 кбіт/с по лінії зв'язку “вгору” до швидкості передачі даних X-Stream (послуги залежать від моделі терміналу). Більшість терміналів також пропонують послуги мобільного зв'язку з комутацією каналів зі швидкістю 64 кбіт/с і навіть низькошвидкісні (4,8 кбіт/с) голосові тощо. Послуга BGAN доступна у всьому світі на всіх супутниках Inmarsat-4.

*Fleet Broad Band (FB):* морська служба, Fleet Broad Band заснована на технології BGAN, пропонуючи подібні послуги та використовуючи ту ж інфраструктуру, що і BGAN. Доступний широкий спектр користувацьких терміналів, призначених для встановлення на морських судах.

*Swift Broad Band (SB):* авіаційна служба, Swift Broad Band заснована на технології BGAN і пропонує подібні послуги. Термінали SB спеціально розроблені для використання на борту комерційних, приватних та військових літаків.

*BGAN M2M:* забезпечує глобальну послугу з низькою швидкістю передачі даних на базі IP для користувачів, які потребують високого рівня доступності даних та продуктивності в постійно безпілотних середовищах. Ідеально підходить для високочастотних та дуже низьких затримок звітування даних, BGAN M2M виявився надзвичайно привабливим для моніторингу основних фондів, таких як трубопроводи та витоки нафтових свердловин, або оброблення даних про споживання електроенергії в межах комунального підприємства.

*Isat M2M* – це глобальна служба зберігання та пересилання коротких пакетних даних, яка формує повідомлення у розмірі 10,5 або 25,5 байт у напрямку відправки та до 100 байт у напрямку прийому. Послуга поставляється на ринок через двох партнерів – мобільний зв'язок SkyWave і Honeywell.

*Isat Data Pro* – це глобальний супутниковий сервіс передачі даних, призначений для двостороннього обміну текстом і передачею даних з

віддаленими ресурсами. Він має можливість швидкого обміну великими обсягами даних (до мобільного – 10 кБайт / з мобільного – 6,4 кБайт з типовим часом доставки 15 с). Ця послуга використовується у критично важливих додатках і використовується у всьому, починаючи з управління вантажними автомобілями, риболовними суднами, нафтогазовим та важким обладнанням, закінчуючи текстовими повідомленнями віддалених працівників та додатків безпеки. Він надається компанією SkyWave Mobile Communications Inc, яка входить до складу Orbcomm.

*Глобальні голосові послуги системи Inmarsat.*

Компанія пропонує послуги портативних та стаціонарних телефонів наступним чином:

*Isat Phone 2* – це надійний, власне розроблений супутниковий телефон, який забезпечує чітку голосову телефонію. Він також постачається з різноманітними можливостями передачі даних, включаючи SMS, надсилання коротких повідомлень електронною поштою, пошук і відправлення GPS, а також підтримує службу передачі даних до 20 кбіт/с.

*Isat Phone Link* – це недорога фіксована глобальна послуга супутникового зв'язку. Вона забезпечує необхідне голосове підключення для тих, хто працює або живе в районах без стільникового покриття, а також має безліч можливостей передачі даних.

*Послуга Fleet Phone* від Inmarsat – це фіксована телефонна послуга, ідеальна для використання на невеликих суднах, де голосовий зв'язок є головною вимогою, або на суднах, де потрібні додаткові голосові лінії. Він надає недорогий, глобальний варіант супутникової телефонної послуги для тих, хто працює або знаходиться за межами стільникового покриття.

Існуючі та розвинуті послуги системи Inmarsat базуються на старих технологіях, а саме:

*Повітряний (класичний аеро):* надає аналогові послуги голосу / факсу / даних для літаків. Три рівні терміналів, Аеро-L (антена з низьким коефіцієнтом підсилення), в першу чергу для пакетної передачі даних, включаючи АКАРС та ADS, Аеро-H (антена з високим коефіцієнтом підсилення) для голосу та факсу / даних середньої якості зі швидкістю до 9,6 кбіт/с та Аеро-I (антена з проміжним коефіцієнтом підсилення) для низької якості голосу та факсу / даних до 2,4 кбіт/с. Зверніть увагу, що існують також версії Inmarsat-C та mini-M / M4 із рейтингом літаків. Авіаційна версія GAN називається Swift 64.



*Inmarsat-B*: послугу було скасовано 30 грудня 2016 року. Вона надавала цифрові голосові послуги, послуги телетекста, середньошвидкісні послуги факсу / передачі даних із швидкістю 9,6 кбіт/с та послуги швидкісної передачі даних із швидкістю 56, 64 або 128 кбіт/с. Також існував “орендований” режим для Inmarsat-B, доступний на запасних супутниках Inmarsat.

*Inmarsat-C* – це термінал з швидкістю передачі даних 1,2 кбіт/с та швидкістю передачі інформації 600 біт/с, має можливості зберігання та пересилання, опитування тощо. Деякі моделі терміналів Inmarsat-C також використовуються в глобальних службах з надзвичайних ситуацій та безпеки GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System), система оснащена GPS.

*Inmarsat-M*: надає голосові послуги зі швидкістю 4,8 кбіт/с та середні швидкості факсу / послуги передачі даних із швидкістю 2,4 кбіт/с. Це відкрило шлях до Inmarsat Mini-M. На даний час служба закрита.

*Mini-M*: надає голосові послуги зі швидкістю 4,8 кбіт/с та середні швидкості факсу / послуги передачі даних із швидкістю 2,4 кбіт/с. Один канал 2,4 кбіт/с займає 4,8 кбіт/с на супутнику. Служба була закрита на початку січня 2017 року.

*MPDS* (Mobile Packet Data Service) – це послуга передачі даних на основі IP, в якій декілька користувачів спільно використовують несучу швидкість 64 кбіт/с, вона постачається з більшістю терміналів, призначених для GAN (Global Area Network), Fleet та Swift64.

*GAN* (Global Area Network): надає вибір низькошвидкісних послуг, таких як голос зі швидкістю 4,8 кбіт/с, факс і дані зі швидкістю 2,4 кбіт/с, ISDN (Integrated Services Digital Network), подібні послуги зі швидкістю 64 кбіт/с (мобільний ISDN) та послуги передачі даних із комутацією пакетів IP зі швидкістю 64 кбіт/с (служба мобільних пакетних даних або MPDS, раніше IPDS (Inmarsat Packet Data Service)). GAN також відомий як “M4”. Служба була закрита на початку січня 2017 року.

*Fleet* – це сімейство мереж, що включає членів Inmarsat-Fleet 77, Inmarsat-Fleet 55 та Inmarsat-Fleet 33 (цифри 77, 55 та 33 походять від діаметра антени в сантиметрах). Подібно до GAN, він забезпечує вибір низькошвидкісних послуг, таких як голос із швидкістю 4,8 кбіт/с, факс/дані із швидкістю 2,4 кбіт/с, послуги середньої швидкості, як факс/дані із швидкістю 9,6 кбіт/с, послуги зі швидкістю 64 кбіт/с та послуги передачі даних із комутацією пакетів IP зі швидкістю 64 кбіт/с



(служба мобільних пакетних даних або MPDS). Останньою послугою, яка буде підтримуватися, є мобільний ISDN зі швидкістю 128 кбіт/с на терміналах Inmarsat-Fleet 77.

*Swift64*: подібно до GAN, надає голосові послуги, факс/дані з низькою швидкістю передачі даних, ISDN 64 кбіт/с та послуги MPDS для приватних, ділових та комерційних літаків. Swift 64 часто продається у багатоканальній версії, щоб підтримувати кілька разів канал з швидкістю 64 кбіт/с.

*Inmarsat D/D+ / IsatM2M*: версія пейджера Inmarsat, хоча набагато більша, ніж наземна. Деякі одиниці оснащені GPS. Оригінальні термінали Inmarsat-D були односторонніми пейджерами. Новіші термінали Inmarsat-D+ є еквівалентом двостороннього пейджера. Основною функцією цієї технології в наш час є відстеження вантажівок та SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) додатків.

*IsatPhone*: надає голосові послуги зі швидкістю 4,8 кбіт/с та послуги передачі даних із швидкістю 2,4 кбіт/с. Ця послуга виникла з угоди про співпрацю з ACeS, і доступний у супутникових регіонах EMEA (Europe, the Middle East and Africa) та APAC (Asia-Pacific region). Покриття доступне в Африці, на Близькому Сході, в Азії та Європі, а також у морських районах регіону EMEA та APAC.

#### *Європейська авіаційна мережа*

30 червня 2008 року Європейський парламент та Рада прийняли Європейське рішення про встановлення єдиного процесу відбору та авторизації ESAP (European S-band Application Process) для забезпечення скоординованого впровадження мобільних супутникових послуг MSS (Mobile Satellite Service) в Європі. Процес відбору був розпочатий у серпні 2008 року та залучив чотири заявки майбутніх операторів (ICO, Inmarsat, Solaris Mobile (зараз EchoStar Mobile), Terre Star).

У травні 2009 року Європейська комісія відібрала двох операторів, Inmarsat Ventures та Solaris Mobile, надавши цим операторам право використовувати конкретні радіочастоти, визначені у рішенні Комісії, та право експлуатувати їхні відповідні супутникові системи. Тепер держави-члени ЄС повинні забезпечити, щоб два оператори мали право використовувати конкретні радіочастоти, визначені у рішенні Комісії, та

право експлуатувати свої відповідні мобільні супутникові системи протягом 18 років з моменту прийняття рішення про вибір.

Inmarsat S-діапазону – супутникова програма надаватиме мобільну мультимедійну трансляцію, мобільний двосторонній широкосмуговий телекомунікаційний зв'язок та послуги MSS наступного покоління у всіх державах-членах Європейського Союзу та на сході до Анкари за допомогою гібридної супутникової / наземної мережі. Він був запущений в 2017 році. Додаткова наземна мережа складається з близько 300 базових станцій LTE, побудованих Deutsche Telekom.

#### *Глобальне розширення Xpress.*

Inmarsat замовив п'ятий супутник у Global Xpress Thales Group. Супутник запущений 26 листопада 2019 року з Космічного центру Гвіани на борту Аріана 5. Супутник був описаний як “супутник з дуже високою пропускною здатністю” і надає послуги на Близький Схід, Індію та Європу. Генеральний директор Руперт Пірс також зазначив, що Inmarsat планує подальше розширення мережі Global Xpress у майбутньому. Випробування нових технологій продемонстрували пропускну здатність 330 Мбіт/с в існуючій мережі Global Xpress, швидкість якої значно перевищує 50 Мбіт/с.

Щоб забезпечити покриття Global Xpress зростаючою кількістю користувачів в арктичному регіоні, Inmarsat планує покращити зв'язок Global Xpress до рівня вище 65° на північ.

Два високопродуктивні багатопроменеві корисні вантажі GX-10A та GX-10B будуть розміщені на високоеліптичних орбітах НЕО (Highly Elliptical Orbits) для забезпечення надійного покриття. Inmarsat працює у партнерстві з Space Norway HEOSAT у місії широкосмугового зв'язку Арктики. Супутники, що несуть план корисного навантаження Inmarsat, виготовлені компанією Інноваційні системи Northrop Grumman. Запуск GX-10A та 10B запланований на 2022 рік.

Наприкінці 2015 року Inmarsat замовив два супутники шостого покоління Airbus. Ці супутники забезпечили корисне навантаження в Ка- та L-діапазоні, а також забезпечили додаткову пропускну здатність існуючих мереж BGAN та Global Xpress.

Inmarsat бере участь у двох програмах, IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) та ICE (Inmarsat Communications Evolution):

*IRIS* – це проект з покращення відстеження літаків та покращення зв'язку між літаками та диспетчерами повітряного руху. Inmarsat забезпечить супутникові лінії зв'язку великої потужності та покращить виявлення місцезнаходжень літаків у часі та просторі.

*ICE* – це партнерство, що призначене для визначення інноваційних технологій, які можуть розширити можливості супутникового зв'язку наступного покоління.

Діапазон частот Inmarsat та Iridium перетинаються один з одним на частоті 1626,5 МГц, отже, кожна радіостанція Satcom має можливість перешкоджати роботі іншої. Зазвичай на багато потужніша радіостанція Inmarsat порушує роботу радіостанції Iridium на відстані 10–800 м [17].

Дані про супутники серії Inmarsat-4 та Inmarsat-5 (GX) наведені в табл. 3.11.

Антенна система супутника (див. рис. 3.34) С-діапазону частот утворює промінь, який спрямований до центру Землі та формує глобальну зону покриття. В L-діапазоні частот формується один глобальний і п'ять зональних променів, які забезпечують приймання і передавання випромінювань із круговою поляризацією.

*Супутник серії Inmarsat-4.* Компанія Astrium Satellites (Тулуза) на замовлення компанії Inmarsat створила три супутники серії Inmarsat-4F3 (див. табл. 3.12, рис. 3.35), на основі платформи Eurostar 3000. Два із них увійшли до складу мережі BGAN і забезпечують роботу в мережі Інтернет зі швидкістю до 432 кбіт/с через термінали з ноутбуками.

Таблиця 3.11

| Супутник      | Покриття                            | Довгота                 | Транспортні засоби | Дата запуску | Послуги  |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------|--|
| Інмарсат-4 F1 | I-4 Азіатсько-Тихоокеанський регіон | 143,5 <sup>0</sup> схід | Атлас V 431        | 11.03.2005   | Сімейство BGAN, SPS та послуги оренди  |
| Інмарсат-4 F2 | I-4 Близький Схід, Азія             | 64,4 <sup>0</sup> схід  | Зеніт-3SL          | 08.11.2005   | Сімейство BGAN, SPS та послуги оренди, FleetBroadband, SwiftBroadband. Перенесено з 25 <sup>0</sup> сходу на 63 <sup>0</sup> схід у середині 2015 року |

## Продовження таблиці 3.11

| Супутник                     | Покриття                                      | Довгота                    | Транспортні засоби  | Дата запуску | Послуги  |
|------------------------------|---|----------------------------|---------------------|--------------|--|
| Інмарсат-4 F3                | I-4 Америки                                   | 98 <sup>0</sup><br>захід   | Протон-М/<br>Бриз-М | 18.08.2008   | Послуги сім'ї та оренди BGAN   |
| Інмарсат-4А F4 (AlphaSat)    | I-4 Європа,<br>Близький Схід, Африка          | 24,8 <sup>0</sup><br>схід  | Аріана 5<br>ЕСА     | 25.07.2013   | Сімейство BGAN, SPS та послуги оренди  |
| Серія Inmarsat-5 (GX)        |   |                            |                     |              |  |
| Inmarsat-5 F1 (GX-1)         | I-5 Європа,<br>Близький Схід, Африка          | 62,6 <sup>0</sup><br>схід  | Протон-М/<br>Бриз-М | 08.12.2013   | Ка-діапазон.<br>Глобальні служби передачі даних,<br>Global Xpress  |
| Inmarsat-5 F2 (GX-2)         | I-5 Америки                                   | 55 <sup>0</sup><br>захід   | Протон-М/<br>Бриз-М | 02.02.2015   | Ка-діапазон.<br>Глобальні служби передачі даних,<br>Global Xpress  |
| Inmarsat-5 F3 (GX-3)         | I-5 Тихий океан, Азія,<br>Західна Америка     | 179,6 <sup>0</sup><br>схід | Протон-М/<br>Бриз-М | 28.08.2015   | Ка-діапазон.<br>Глобальні служби передачі даних,<br>Global Xpress  |
| Inmarsat-5 F4 (GX-4)         | I-5 Європа                                    | 56,5 <sup>0</sup><br>схід  | Falcon 9FT          | 15.05.2017   | Ка-діапазон.<br>Глобальні служби передачі даних,<br>Global Xpress  |
| Inmarsat-5 F5 (GX-5)         | Перший із додаткових супутників Global Xpress | 11 <sup>0</sup><br>схід    | Аріана 5<br>ЕСА     | 26.11.2019   | Ка-діапазон.<br>Глобальні служби передачі даних,<br>перший супутник Global Xpress після 4 супутників першого покоління |
| Європейська авіаційна мережа |   |                            |                     |              |  |
| Inmarsat S EAN (HellasSat 3) | Європа  | 39 <sup>0</sup><br>схід    | Аріана 5            | 28.06.2017   | S-діапазон.<br>Послуги для європейської авіації  |
| Inmarsat-4А F4 (AlphaSat)    | I-4 Європа,<br>Близький Схід, Африка          | 24,8 <sup>0</sup><br>схід  | Аріана 5<br>ЕСА     | 25.07.2013   | Сімейство BGAN, SPS та послуги оренди  |

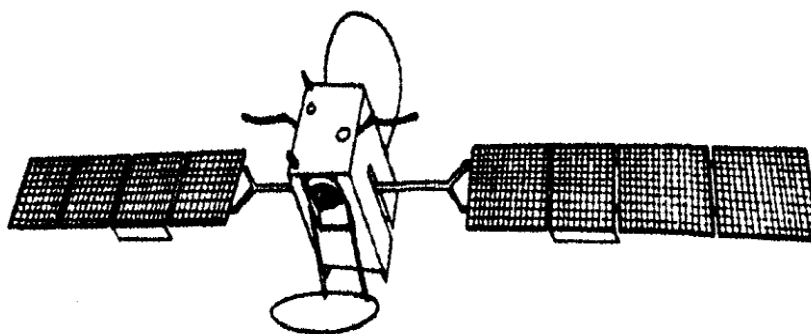


Рисунок 3.34 – Антенна система супутника Inmarsat



Рисунок 3.35 – Супутник серії Inmarsat-4 F3

Антенна система Inmarsat-4 L-діапазону частот створена компанією Northrop Grumman Astro Aerospace. Вона складається з параболічного дзеркала діаметром 9 м і решітки випромінювачів із 120 симетричних вібраторів, які розгортаються на орбіті. Система формує 228 вузьких і 19 широких променів (для сумісності із зонами обслуговування супутників серії Inmarsat-3) з можливістю їх перенацілювання і перерозподілу потужності в них.

Антени С-діапазону (одна на передавання, інша на приймання) формують глобальні промені із круговою поляризацією (правого і лівого обертання).

*Супутники серії Inmarsat-5.* Компанія Inmarsat у серпні 2010 році замовила компанії Boeing створення трьох супутників серії Inmarsat-5 на платформі BSS-702HP.

Супутники оснащені 89-а ретрансляторами Ka-діапазону частот з

глобальною зоною покриття 89-а променями.

Платформа BSS-702HP генерує приблизно 15 кВт потужності (13,8 кВт до кінця 15-річного розрахункового строку експлуатації) двома сонячними батареями по 5 панелей кожна на три перехідних GaAs сонячних елементах. Для всіх видів маневрування на орбіті встановлена ксенон-іонна імпульсна система, яка в 10 разів ефективніша звичайного рідинного реактивного двигуна.

Таблиця 3.12

|   |                      |
|---|----------------------|
| Платформа   | Eurostar 4000GM      |
| Стартова маса, кг   | 5 959 (1); 5 958 (2) |
| Суха маса, кг   | 3 300                |
| Потужність сонячних батарей на початку/кінці строку експлуатації, кВт   | 13/9                 |
| Кількість передавачів:<br>С-діапазону частот<br>(3400...4200/5850...67250 МГц)                                    | 4                    |
| L-діапазону частот (1518...1559/1626,5...1660,5;<br>1668...1675 МГц)  | 120                  |
| Максимальна потужність передавачів<br>С-діапазону частот, Вт  | 40                   |
| Максимальна ЕІВП (Ефективна ізотропно<br>випромінювана потужність) у L-діапазоні частот<br>(вузькі промені), дБВт | 67                   |

Зовнішній вигляд телефонів Inmarsat зображений на рис. 3.36.



Рисунок 3.36 – а) Inmarsat IsatPhone2; б) Inmarsat IsatPhone Pro



### 3.9 Система супутникового зв'язку Iridium

Проект низькоорбітальної супутникової системи зв'язку Iridium оснований на широкому міжнародному співробітництві. У розробленому проекті спочатку передбачалося використовувати 77 супутників. Саме цій кількості супутників проект зобов'язаний своєю назвою: 77-й елемент у таблиці Менделєєва – іридій. Правда пізніше з ряду причин було вирішено зменшити кількість супутників в орбітальному групуванні до 66, але назва проекту залишилася попередньою (рис. 3.37). В орбітальному групуванні для забезпечення мінімальної відстані між сусідніми супутниками вибрана оптимальна різниця кутів  $27^\circ$  між площинами їхніх орбіт.



Рисунок 3.37 – Орбітальне групування супутників Iridium

Основні параметри орбітального групування:

орбіти – квазіполярні з нахилом  $86,4^\circ$ ;

кількість орбіт – 6;

кількість супутників на одній орбіті – 11;

кутова відстань між супутниками, що знаходяться на одній орбіті –  $32,7^\circ$ ;

висота орбіт – 780 км;

період обертання супутників навколо Землі – 100 хв.

Відмінними рисами системи супутникового зв'язку Iridium є використання міжсупутникових каналів зв'язку і супутникових ретрансляторів зі складною обробкою сигналів. При цьому в системі супутникового зв'язку Iridium існує можливість з'єднання абонентів системи без участі наземних ліній зв'язку. Однак для досягнення



незалежності системи Iridium від наземних мереж доводиться використовувати досить складні та дорогі супутники. Принципи керування зв'язком в системі супутникового зв'язку Iridium використовуються ті ж самі, що і у стільникових системах радіозв'язку. Однак на відміну від наземних стільникових систем, де базові станції зв'язку встановлюються стаціонарно, а абоненти рухомі відносно базової станції, у системі Iridium рухомою є сама базова станція, встановлена на супутнику.

Зв'язок з рухомим абонентом здійснюється в діапазоні рухомої супутникової служби, а зі шлюзовими станціями, що здійснюють сполучення з комутованою мережею загального користування, – у діапазоні фіксованої супутникової служби.

Система Iridium призначена для глобального рухомого персонального зв'язку за принципом “кожен-кожному” на основі міжсупутникових зв'язків. Вона забезпечує наступні види зв'язку і послуг:

- ✓ дуплексний радіотелефонний зв'язок;
- ✓ факсимільний зв'язок;
- ✓ передача даних;
- ✓ зв'язок між абонентами, що мають персональні супутникові термінали;
- ✓ зв'язок абонентів загальної телефонної мережі з користувачами персональних супутникових терміналів;
- ✓ передача сигналів оповіщення на пейджер;
- ✓ визначення місця розташування абонентів.

Для надання перерахованих видів послуг компанія Motorola пропонує різні малогабаритні супутникові телефони і мобільні персональні термінали (масою до 2,5 кг). Кожен користувацький термінал реєструється в національній шлюзовій станції, де йому присвоюється кодовий номер і визначається первинне територіальне розміщення.

До складу кожного супутникового телефону входить змінний або постійно встановлюваний елемент – модуль ідентифікації абонента (SIM-карта), що містить індивідуальний номер телефону та іншу інформацію. Абонент системи Iridium має єдиний номер телефону, доступний у будь-якому куточку світу, де дозволено користуватися послугами цієї системи. Користувачами універсального сервісного пакета послуг можуть стати як абоненти мережі Iridium, так і абоненти наземних стільникових мереж (підключившись до такого пакету послуг, вони зберігають свій номер стільникового телефону). Практично цей вид послуг

розширює для останніх зону дії системи стільникового зв'язку. Міський сервісний пакет системи Iridium призначений для користувачів, що мають потребу у використанні наземного рухомого зв'язку між стільниковими мережами різних стандартів.

Швидкість передачі мовних повідомлень – 4,8 кбіт/с.

Поряд з телефонним зв'язком Iridium здатний забезпечити передачу даних і факсимільних повідомлень між будь-якими точками планети. Для цього абонентам системи досить обладнати мовний термінал модемом. Швидкість передачі даних – 7,4 кбіт/с.

Крім того система забезпечує передачу повідомлень про координати абонента, обумовлених як засобами мовного зв'язку, так і спеціальними абонентськими пристроями.

Пропускна здатність системи Iridium складе 56000 дуплексних телефонних каналів.

Будь-який супутник орбітального групування системи Iridium формує 48 променів випромінювання, утворюючи кожним променем на Землі стільник розміром 640 км. Орбітальне групування формує на поверхні Землі приблизно 2150 стільників при використанні 48 променів кожного супутника.

У сукупності 48 променів створюють підсупутникову зону розміром приблизно 4500 км. Все орбітальне групування формує квазісуцільну підсупутникову зону, що покриває всю поверхню Землі. Формування підсупутникової зони здійснюється за допомогою розташованих на кожному супутнику шести антенних фазованих ґраток. Кожна ґратка формує вісім променів. Завдяки застосуванню багатопроменевих антен і стільникової структури зони обслуговування, робочі частоти в системі Iridium використовуються багаторазово. При цьому в суміжних стільниках використовуються різні частоти, а в кожному восьмому стільнику можливе повторення частот. У результаті частоти діапазону 1616,0–1626,5 МГц використовуються в системі більш 150 разів.

У радіолініях “абонент–супутник” і “супутник–абонент” застосовується часове розділення каналів. Формат багатостанційного доступу поєднує часове розділення каналів для кожного стільника і частотне розділення для суміжних стільників (FDMA). За допомогою фазової маніпуляції здійснюється кодування інформації, що забезпечує стиснення мовної інформації в цифровому вигляді. Інформація про стиснення, а також сигнали циклічної і тактової синхронізації передаються

по каналу керування, для чого в радіолінії “супутник–абонент” задіяні 4 радіоканали. Коефіцієнт стиснення інформації (2,2/1) дозволяє забезпечити передачу в радіолінії “супутник–абонент” 55 мовних каналів на 25 несучих частотах. Імовірність помилки на біт не перевищує:  $10^{-3}$  – при передачі радіотелефонної інформації;  $10^{-6}$  – при передачі цифрових даних.

У табл. 3.13 подані L- і Ka- діапазони частот радіоліній системи Iridium.

Таблиця 3.13

| Діапазон | Радіолінія                 | Діапазон частот   | Смуга частот каналу зв'язку |
|----------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| L        | “абонент-супутник”         | 1616,0–1625,5 МГц | 126 кГц                     |
|          | “супутник-абонент”         | 1616,0–1626,5 МГц | 280 кГц                     |
| Ka       | “супутник-шлюзова станція” | 19,6 ГГц          | 100 МГц                     |
|          | “шлюзова станція-супутник” | 29,1–29,3 ГГц     | 100 МГц                     |
|          | Міжсупутниковий зв'язок    | 23,18–23,38 ГГц   | 200 МГц                     |

Кожен супутник орбітального групування має радіолінії зв'язку з двома сусідніми супутниками, що знаходяться в одній орбітальній площині з ним, і двома супутниками в сусідніх (ліворуч і праворуч) орбітальних площинах.

Для підтримки міжсупутникового зв'язку на кожному супутнику є чотири щілинні антенні ґратки з коефіцієнтом підсилення 36 дБ. Точність керування діаграмою спрямованості кожної антени складає  $\pm 5^\circ$ . Використовується смуга частот шириною 200 МГц у діапазоні 23,18–23,38 ГГц. Для виключення взаємних завад у міжсупутникових каналах зв'язку смуга частот шириною 200 МГц розбита на 8 окремих частотних смуг, що утворюють окремі канали зв'язку. Швидкість передачі інформації в кожному каналі – 25 Мбіт/с. Метод маніпуляції і кодування інформації – такі ж, як у радіолінії “супутник-абонент”. Імовірність помилки не вища  $10^{-6}$ . Кожен канал міжсупутникової лінії зв'язку підтримує 600 телефонних каналів без стиснення.

Система Iridium, структура якої наведена на рис. 3.38, містить чотири сегменти:

- ✓ космічний сегмент (супутники);

- ✓ сегмент керування, що складається із центра керування системою, який містить обчислювальний центр і станцію управління;
- ✓ шлюзові наземні станції, що здійснюють швидкий і ефективний зв'язок системою супутникового зв'язку із телефонними мережами загального користування (ТМЗК);
- ✓ абонентські термінали.

Кожний супутник має вагу до 450 кг і містить по три ретранслятори, призначених для реалізації абонентського каналу, каналу керування та каналу міжсупутникового зв'язку.

Кожний з супутників має по три комплекти антен:

- ✓ антени основного призначення;
- ✓ антени перехресного міжсупутникового зв'язку;
- ✓ антени каналу керування.

Антени основного призначення служать для зв'язку з абонентськими пристроями. У комплект антен основного призначення супутника включені сім антен з фазованими ґратками, кожна з яких містить набір локальних модулів прийому й передачі. Шість ідентичних антен утворюють тіло супутника у формі шестикутного циліндра, а сьома, розташовувана в його нижній частині, приймає сигнали по одиничному променю та випромінює сигнали від супутника.

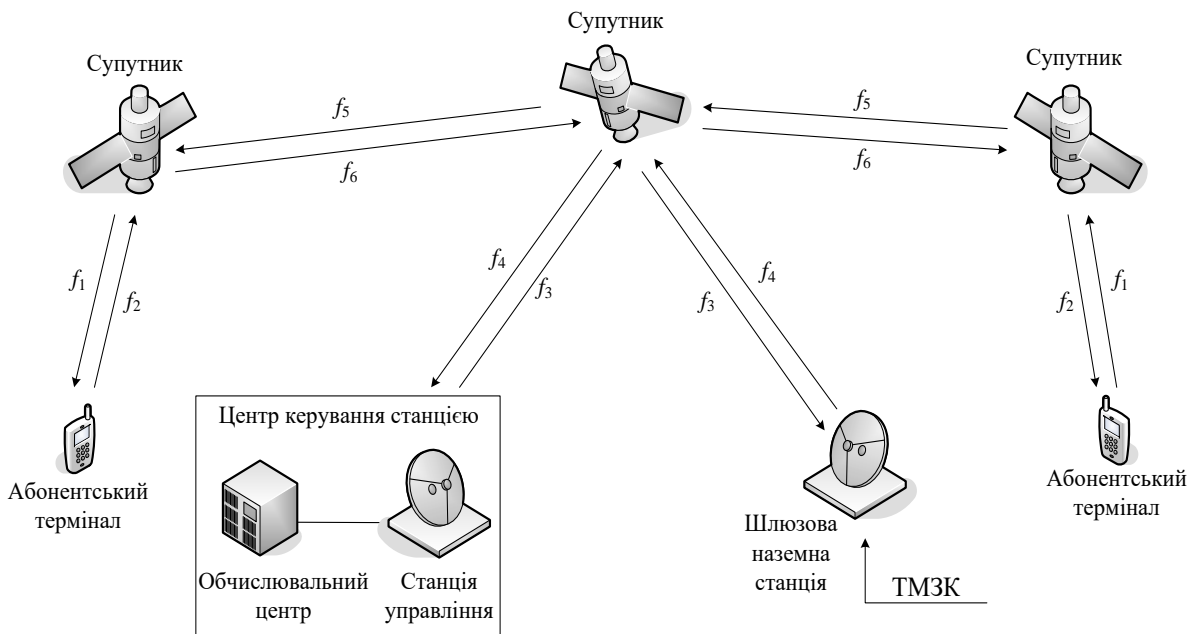


Рисунок 3.38 – Структурна схема системи супутникового зв'язку Iridium

У системі Iridium повинні використовуватися як мінімум дві станції керування, оскільки сегмент керування повинен організувати комунікаційні канали зі “східним” супутником до перерви зв'язку з “західним” супутником.

З метою забезпечення нормального функціонування системи в різних ситуаціях – при невдалій роботі, аваріях земних станцій і навіть при катастрофічних відмовах будь-яких ланок земного або космічного сегмента, відсутності з якихось причин супутника на своїй “робочій” орбіті і т. д., у системі супутникового зв'язку Iridium передбачене використання біля десяти станцій керування, розосереджених по різних континентах.

Шлюзова станція складається з трьох ідентичних комплексів прийому і передачі. Кожен комплекс має швидкодіючий комп'ютер (у якому зберігається банк даних про персональні термінали) і комутаційне устаткування для зв'язку з телефонною мережею загального користування. У роботі постійно знаходяться два комплекси прийому і передачі, що по черзі підтримують зв'язок із супутниками, які знаходяться в зоні видимості. Третій комплекс прийому та передачі – резервний. При необхідності він може замінити 1-й або 2-й комплекс.

Абонентські термінали мають наступні види:

- ✓ портативні й мобільні засоби;
- ✓ телефонні будки з сонячними батареями;
- ✓ спеціалізоване авіаційне й морське абонентське устаткування;
- ✓ алфавітно-цифрові радіовикличні пристрої, за допомогою яких система Iridium буде забезпечувати своїх користувачів принаймні однією з таких послуг: телефонний і факсимільний зв'язок, передача цифрових даних, передача інформації про місцезнаходження [18].

### **3.10 Експлуатація портативного супутникового терміналу Hughes 4200**

Портативний термінал Hughes 4200 (рис. 3.39) забезпечує надійне супутникове підключення через супутникову мережу EchoStar Mobile GMR-1 3G. Hughes 4200 зібраний в невеликому портативному корпусі та дозволяє користувачеві відправляти та отримувати IP-пакели через інтерфейси Ethernet та Wi-Fi. Паралельно з послугами пакетної передачі даних, Hughes 4200 підтримує голосові дзвінки через стандартний

інтерфейс POTS (Plain Old Telephone Service), а також через програмний додаток на основі IP.



Рисунок 3.39 – Портативний термінал Hughes 4200

Перед початком роботи з Hughes 4200 необхідно встановити USIM (Universal Subscriber Identity Module) (рис. 3.40) та акумулятор у термінальний блок, а потім повністю зарядити акумулятор за допомогою адаптера живлення змінного/постійного струму, що йде в комплекті, перед увімкненням живлення.



Рисунок 3.40 – Вставлення сім-карти


### *Швидкий старт*

Натисніть кнопку живлення щонайменше на 2 секунди, щоб увімкнути пристрій.

Оскільки термінал Hughes 4200 є портативним пристроєм, спочатку потрібно отримати фіксацію GPS, поклавши термінал з антеною направленою вгору та з відкритим видом на небо.

Значок GPS на РК-дисплеї вказує на стан GPS-інформації в терміналі.

Позначка **GPS** блимає після включення живлення, доки не буде отримано нове місцезнаходження за GPS. Індикатор позначки **GPS** горить постійно, коли термінал вже має нове місцезнаходження за GPS (див. рис. 3.41).

Позначка  супутників, розташована поруч із значком GPS, вказує на стан приймача GPS у терміналі та кількість видимих супутників. Позначки вимкнені, коли GPS-приймач вимкнено.

Позначки активні, коли GPS-приймач увімкнено, вони блимають або підсвічені постійно (стаціонарний режим). Кількість значків у стаціонарному режимі вказує на кількість супутників GPS у видимості. Нам знадобляться всі три, щоб отримати нове GPS місцезнаходження. Зауважимо, що як тільки буде адекватне визначено GPS місцезнаходження, GPS-приймач і всі значки супутників будуть вимкнені, а слово “GPS” буде підсвічено постійно.

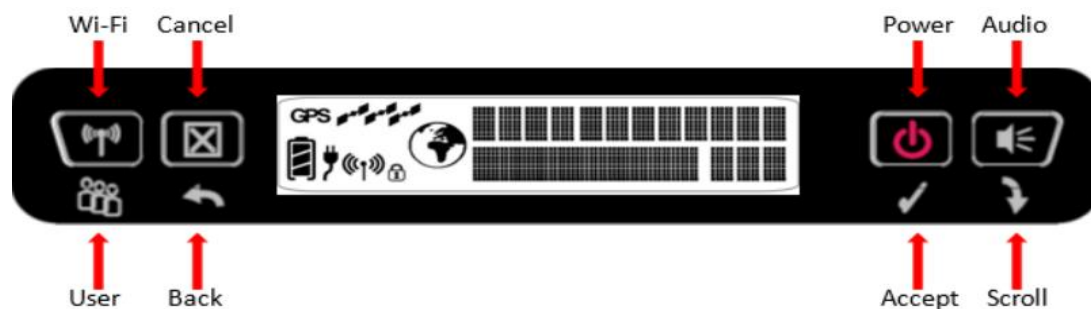


Рисунок 3.41 – Термінал iUI (LCD)

Необхідно використовувати візуальну панель рівня сигналу та числовий дисплей у нижньому рядку, щоб допомогти направити термінал на супутник. Перебуваючи в режимі вказівок (pointing mode), ви також можете активувати голосові підказки, тривалим натисканням кнопки аудіо/прокрутки (Audio/Scroll) (див. рис. 3.42).

Після того, як пристрій буде точно спрямований на супутник, необхідно вийти з режиму вказівок за допомогою довгого натискання



кнопки скасування/назад (Cancel/Back). Тепер пристрій спробує зареєструватися в супутниковій мережі.



Рисунок 3.42 – Азимут та кут місця супутника

Після того, як пристрій зареєструється та під'єднається з комутацією пакетів (PS), він автоматично створить “Спільне” (Shared) підключення даних.

#### *Швидкий запуск веб-інтерфейсу*

Крім того, існує можливість підключити комп'ютер і використовувати внутрішній веб-сервер Hughes 4200. З кінцевого обладнання (наприклад, ПК), необхідно ввести 192.168.128.100 як URL-адресу для доступу до домашньої сторінки Hughes 4200.

Сторінка “Статус терміналу” містить всю необхідну інформацію для реєстрації в мережі та вказівки. Потрібно визначити профіль APN (Access Point Name) для підключення до мережі (рис. 3.43).

На підсторінці “Профілі APN” необхідно ввести відомості про APN, а саме: ім'я користувача APN; Пароль для мережі. Потрібно натиснути кнопку “Додати профіль”, щоб його зберегти.

Після збереження профілю він з'явиться в таблиці зліва.

Після того, як отримано GPS місцезнаходження і пристрій якомога краще спрямований на супутник, необхідно натиснути кнопку “Реєстрація в мережі” (Register with Network), щоб почати процес реєстрації. Після реєстрації та підключення термінал автоматично встановлює спільне (Shared) з'єднання (див. рис. 3.44).

Ви також можете встановити виділене з'єднання та вибрати якість обслуговування (QoS) для своїх підключень зі сторінки “Підключення” (Connections).

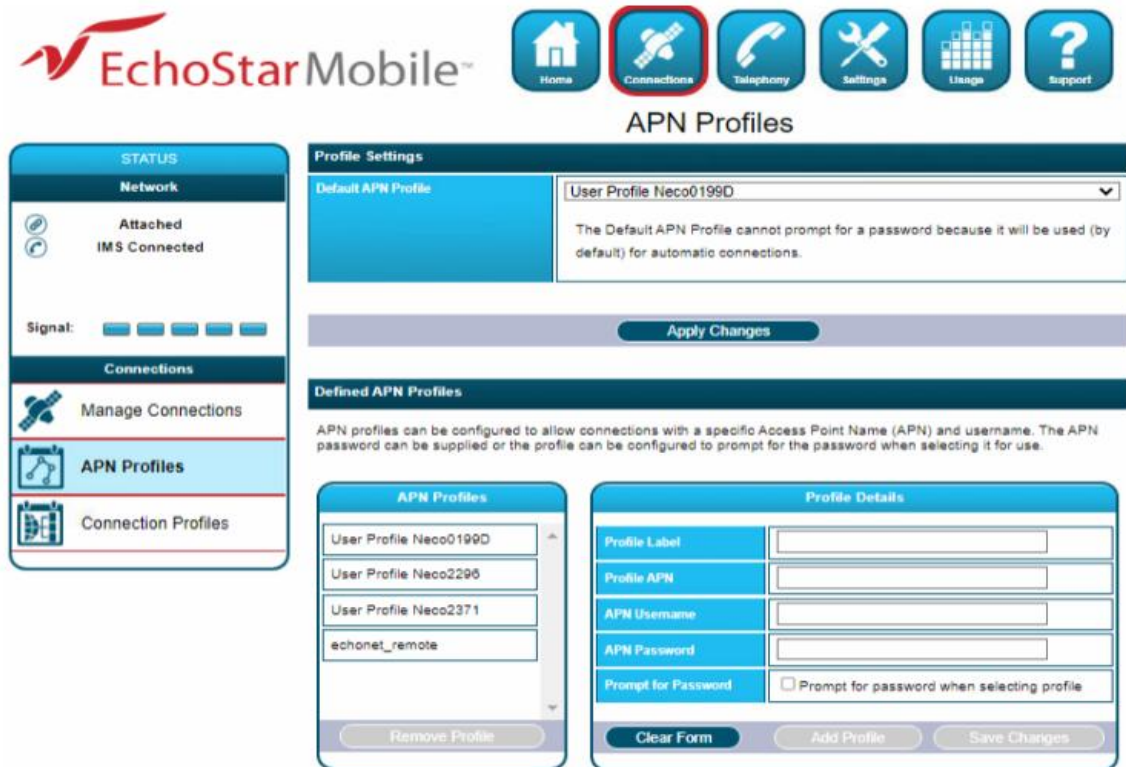


Рисунок 3.43 – Задання назви точки доступу (APN) на веб-інтерфейсі

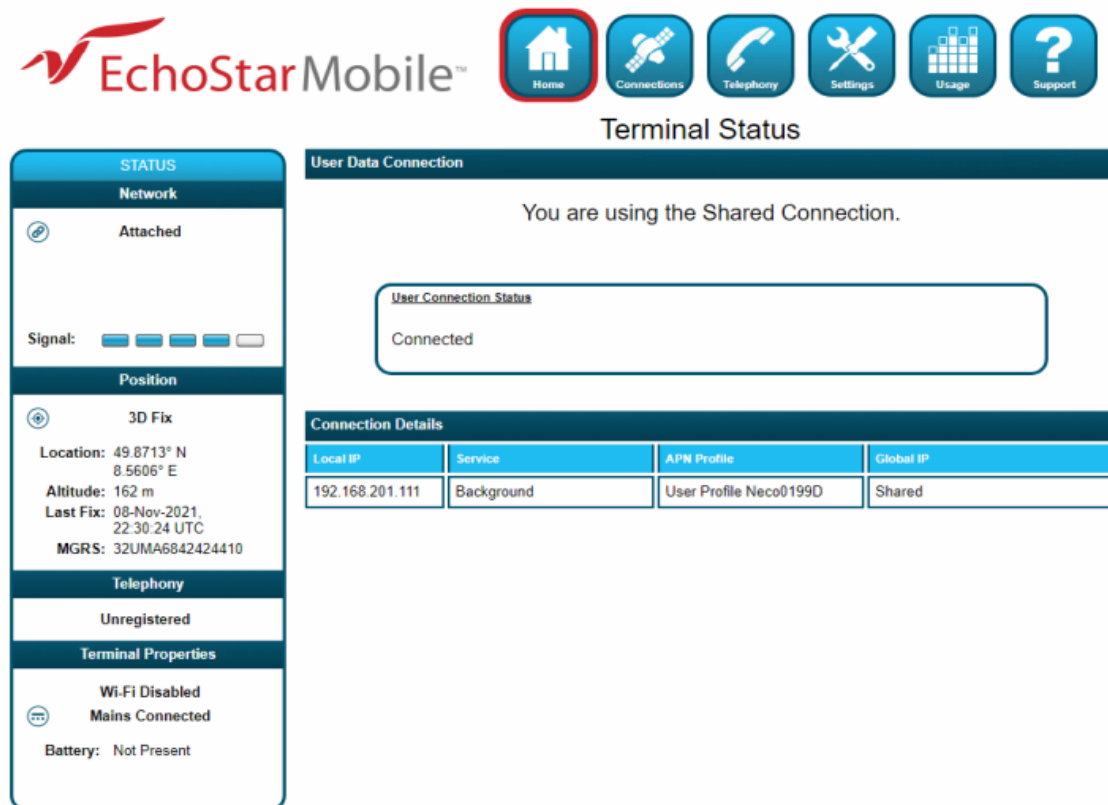


Рисунок 3.44 – Спільне з'єднання (Shared) встановлено на WebUI

### Підключення терміналу до комп'ютера

Існує можливість підключити свій комп'ютер до Hughes 4200 за допомогою одного або кількох із наступних інтерфейсів: Ethernet; Wi-Fi.

Під час початкового налаштування термінал можна налаштувати лише за допомогою Ethernet підключення. Після того, як термінал налаштовано, обидва інтерфейси (Ethernet та Wi-Fi) можна використовувати для передачі даних залежно від потрібної послуги.

Комп'ютер має бути налаштований на підтримку вибраного методу підключення.

Щоб увімкнути Wi-Fi, необхідно натиснути і утримувати (> 2-х секунд) кнопку Wi-Fi на передній панелі терміналу.

- ✓ SSID за замовчуванням – “EM-останні 7 цифр IMEI”.
- ✓ Номер каналу за замовчуванням – 11.
- ✓ До 4 користувачів можуть підключатися через W-Fi.

Не можна увімкнути шифрування WPA або WPA2 на дисплеї/клавіатурі інтерфейсу. Шифрування Wi-Fi має бути налаштовано у веб-інтерфейсі (див. рис. 3.45).

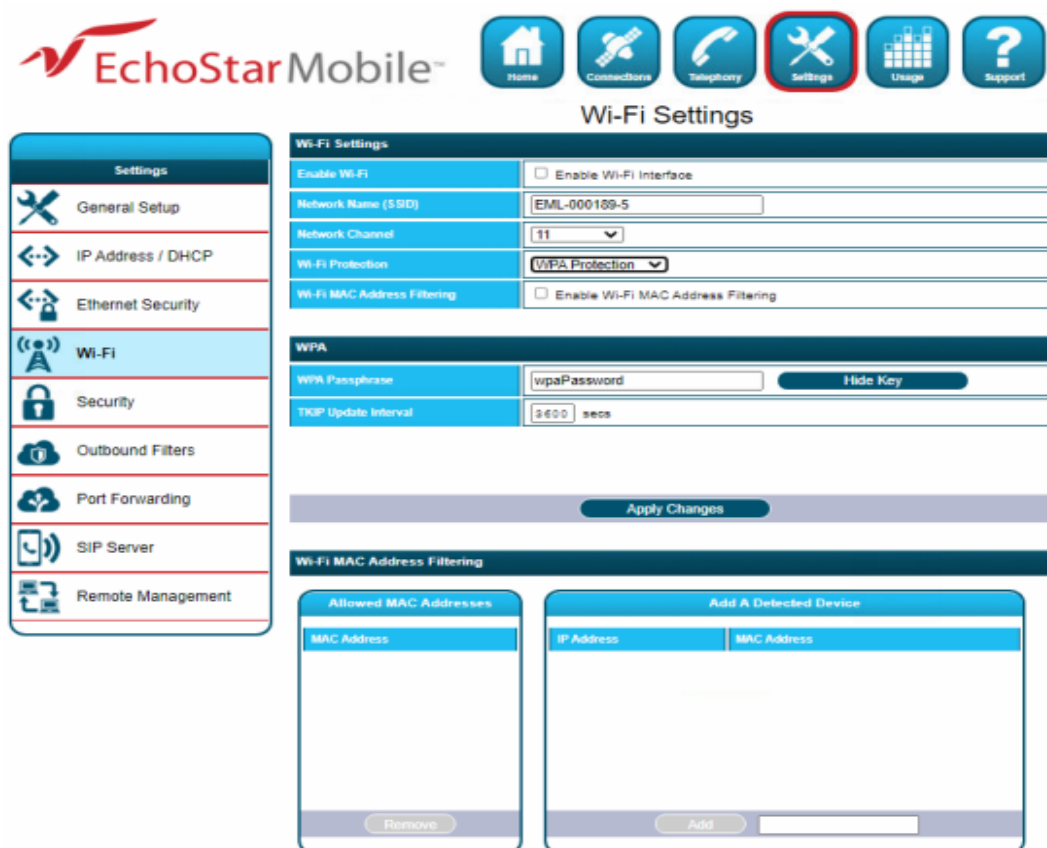


Рисунок 3.45 – Wi-Fi налаштування у веб-інтерфейсі

Статус захисту WPA і WPA2: необхідно встановити прапорець “Увімкнути” (Enable) WPA або WPA2 для додаткової безпеки.

Ключ WPA або WPA2: рекомендується замінити пароль за замовчуванням на власний унікальний пароль.

Трансляція SSID: для додаткової безпеки можна відмовитися транслювати свій SSID.

Фільтрація MAC: для додаткової безпеки необхідно встановити прапорець “Увімкнути” MAC Фільтрацію. Можна визначити до 10 дозволених MAC-адрес, щоб підключитися до Wi-Fi.

Щоб визначити MAC-адресу ПК, потрібно перейти до підказки DOS і ввести ipconfig/all.

Для Mac OS X у меню Apple необхідно перейти до Системні налаштування > Мережа та Show Airport. Ідентифікатор Airport– це MAC-адреса або перейти до Про цей Mac > Додаткова інформація > мережа та вибрати Airport.

Коли Wi-Fi увімкнено, неавторизовані користувачі можуть отримати доступ до ваших EchoStar Mobile сервісів. Якщо WPA/WPA2 увімкнено, необхідно надати іншим користувачам Wi-Fi пароль, щоб вони могли підключитися до терміналу. Також можна перейти на сторінку “Керування підключеннями” (Manage Connections) у веб-інтерфейсі, щоб подивитися, які комп’ютери насправді використовують послуги EchoStar Mobile.

#### *Підключення через RJ-11*

Порт RJ-11 активний за замовчуванням. Можна підключити аналоговий телефон безпосередньо до порту RJ-11 за допомогою RJ-11 кабелю для здійснення голосових дзвінків.

Щоб набрати номер, додайте перед міжнародним номером 00 і завершіть його з #. Наприклад, щоб набрати номер в Україні, введіть: 003802908425# (00 + код країни + номер телефону + #).

Ваш номер телефону EchoStar Mobile використовує загальний код країни 882 з ідентифікаційним кодом 48. Ваш номер телефону буде у форматі +88248nnnnnnnn

#### *Підключення за допомогою Wi-Fi – послуга SIP-телефонії*

Послуга SIP-телефонії дозволяє здійснювати телефонні дзвінки за допомогою програми SIP-Softphone на смарт-пристрої (смартфон або планшет), який підключений через Wi-Fi (див. рис. 3.46).

Щоб підготувати свій розумний пристрій, потрібно завантажити програму для програмного телефону з Apple App Store або магазину Android Play. Рекомендовані програми: Liphone; Groundwire.

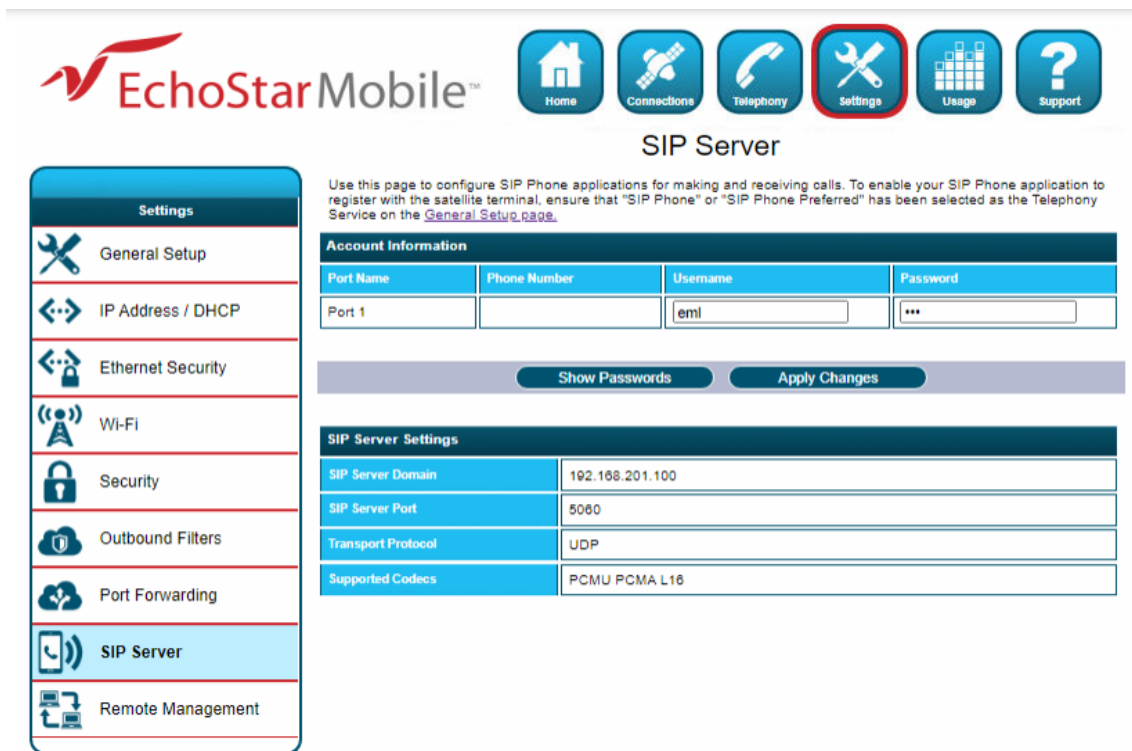


Рисунок 3.46 – Налаштування SIP-сервера у веб-інтерфейсі

Підключіть свій пристрій до Hughes 4200 за допомогою Wi-Fi.

Щоб підготувати Hughes 4200, потрібно перейти на сторінку Параметри/SIP-сервер у веб-інтерфейсі та ввести ім'я користувача та пароль.

Щоб застосувати зміни та перезапустити термінал, потрібно перезавантажити SIP-сервер у Hughes 4200 з оновленою інформацією облікового запису.

Щоб зареєструвати смарт-пристрій на сервері Hughes 4200 SIP, необхідно ввести ту саму інформацію облікового запису на програмі для телефону разом з інформацією, наданою для налаштувань сервера SIP.

Потрібно увімкнути службу SIP Phone на сторінці Параметри/Загальні налаштування веб-інтерфейсу. Під Налаштуванням телефонії потрібно вибрати один із наступних параметрів для послуги телефонії:

- Бажано SIP-телефон:

З цим вибором термінал використовуватиме SIP програму для телефону, якщо вона зареєстрована, в іншому випадку – використовуватиметься стаціонарний телефон, підключений через RJ-11.

- Лише SIP-телефон:

Якщо вибраний лише SIP-телефон і немає смарт-пристрою та телефон не зареєстрований, то зробити чи отримати телефонні дзвінки буде неможливо, навіть якщо стаціонарний телефон підключено до порту RJ-11.

Статус SIP-сервера можна перевірити, натиснувши кнопку “Статус SIP-сервера” в інтернет-телефонії Сторінки інтерфейсу користувача.

Після успішної реєстрації програми Softphone на смарт-пристрої можна створювати та отримувати телефонні дзвінки за допомогою смарт-пристрою.

#### *LCD-дисплей і клавіатура*

Термінал Hughes 4200 має LCD-дисплей (рис. 3.47), який надає інформацію про стан терміналу. Також є клавіатура, яка дозволяє керувати робочими функціями терміналу без використання ПК або браузера. Він також включає в себе керування звуковим допоміжним обладнанням, вбудованим у термінал.

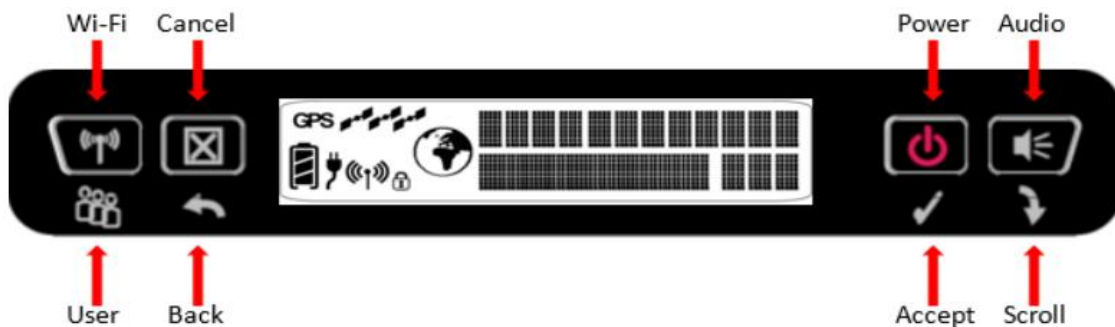


Рисунок 3.47 – Схема LCD-дисплея та клавіатури

Термінал Hughes 4200 має чотири кнопки для користувача. Кожна кнопка виконує дві основні функції, одна активізується коротким натисканням, а інша довгим натисканням. Верхній значок (іконка на кнопці) – функція тривалого натискання. Нижній значок – функція короткого натискання (див. табл. 3.14).



Таблиця 3.14

| Назва кнопки | Коротке натискання                  | Тривале натискання            |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| User         | Вибір користувача                   | Ввімкнення/вимкнення Wi-Fi    |
| Back         | Повернення до попереднього меню     | Вихід з меню/режима вказівок  |
| Accept       | Вхід в меню та підтвердження вибору | Ввімкнення/вимкнення живлення |
| Scroll       | Прокрутка у меню                    | Ввімкнення/вимкнення звуку    |

“Коротке натискання” означає натискання клавіші менше двох секунд.

“Довге натискання” означає натискання клавіші протягом двох секунд або довше.

За замовчуванням при включенні живлення LCD-дисплей відображає вказівний дисплей. Верхній рядок чергується між “Вказівник” (Pointing), а також азимутом та кутом місця найближчого супутника. На рис. 3.48 супутниковий пеленг Південь-Південний Схід (SSE), кут місця до супутника становить 46 градусів, а потужність сигналу становить 51 дБ.



Рисунок 3.48 – Відображення режиму вказівок

Азимут позначається скороченими напрямками компаса, як показано на рис. 3.49.

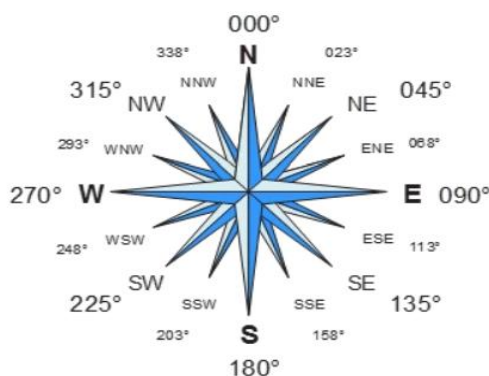


Рисунок 3.49 – Визначення азимуту



Звуковий сигнал забезпечує звукове уявлення про якість сигналу під час наведення антени. При увімкненні, індикатор видає вказівні тони, темп і висота яких збільшуються у міру збільшення сили сигналу. Якщо супутник не знайдено, за одним тоном слідує пауза.

Тривале натискання кнопки аудіо, дозволить увімкнути або вимкнути індикатор аудіо.

Після того, як термінал точно був спрямований на супутник, необхідно вийти, натискаючи на кнопку “Назад”. Це призведе до спроби пристрою зареєструватися в мережі (Примітка: якщо вказівні звукові тони були увімкнені під час режиму вказівок, вони автоматично вимикаються, при спробі реєстрації у мережі).

Після того, як термінал перестає працювати у режимі вказівок, він автоматично спробує підключитися до мережі та встановити “Спільне” (Shared) підключення. Під час цієї операції у верхньому рядку LCD-дисплея відображається “Прикріплення” (Attaching).

Після підключення та встановлення режиму “Спільне” на LCD-дисплеї у верхньому рядку відображається “Спільне” (Shared).

Після реєстрації в IMS пристрій готовий до голосових дзвінків і відображає значок земної кулі.

У режимі очікування потужність отриманого супутникового сигналу відображається 5-смуговим індикатором, розташованим у нижньому правому куті LCD-дисплея.



Рисунок 3.50 – Відображення режиму очікування

Якщо обладнання користувача підключено (через Ethernet або бездротову локальну мережу), у нижньому рядку з’явиться “ADDR”, а потім останній октет IP-адреси поточного вибраного терміналу користувача. Якщо додаються кілька пристроїв, ви можете вибрати інформацію про іншого користувача, натискаючи кнопку користувача (User), доки не побачите значок потрібного пристрою.

Верхня частина LCD-дисплея використовується для повідомлень про стан і пункти меню. Повідомлення про стан перелічено в табл. 3.15.

Таблиця 3.15

| Відображення   | Опис   |
|----------------|--|
| HUDGES 4200    | На екрані під час увімкнення живлення.   |
| Boot Failure   | Не вдалося завантажити термінал.   |
| Insert SIM     | SIM не виявлено. Щоб продовжити, вставте SIM-карту.  |
| Reading SIM... | Термінал зчитує інформацію з SIM-карти.  |
| Enter PIN      | Потрібен PIN-код SIM-карти. (Його можна ввести за допомогою кнопок на передній панелі)   |
| Enter PUK      | Потрібен PUK-код SIM-карти. (Його потрібно ввести за допомогою веб-інтерфейсу)   |
| SIM Blocked    | SIM-карта заблокована через забагато спроб введення PIN/PUK SIM-карти  |
| SIM Error      | Помилка зв'язку SIM-карти.   |
| Unlock SIM     | Термінал заблоковано на іншу SIM-карту, і потрібен PIN-код блокування SIM-карти. (Його має бути введено за допомогою веб-інтерфейсу) |
| Wrong SIM      | У цьому пристрої виявлено неправильну SIM-карту. Вставлена SIM-карта не та SIM-карта, яка була спочатку вставлена до терміналу.      |
| Bad SIM        | SIM-карта недійсна.  |
| Getting POS... | Термінал отримує позицію GPS.  |
| Searching...   | Термінал шукає супутниковий сигнал. Це повідомлення чергується з визначенням азимуту та куту підйому за 3-секундний цикл.            |
| Point ANT      | Термінал перебуває в режимі наведення антени. Це повідомлення чергується з визначенням азимуту та куту підйому за 3-секундний цикл.  |
| Attaching...   | Термінал підключається до мережі.  |
| Ready          | Термінал підключено до мережі, але на даний момент не відкрито з'єднання для передачі даних.   |
| Shared         | Обраний кінцевий пристрій використовує спільний контекст за замовчуванням.   |
| Background     | Обраний кінцевий пристрій використовує фонове з'єднання для передачі даних.  |
| Stream {rate}K | Обраний кінцевий пристрій використовує з'єднання потокової передачі даних. Вказано швидкість потокового передавання.                 |
| SAT Blocked    | Супутниковий сигнал тимчасово з перешкодами, блокується з'єднання.   |
| Charged        | Акумулятор повністю заряджений.  |
| Charging       | Акумулятор заряджається  |
| Battery Low    | Низький рівень заряду акумулятора  |
| Batt Empty     | Заряд акумулятора майже пустий   |
| Too Hot        | Пристрій занадто гарячий; якщо не виправити, може відбутися тимчасове теплове відключення  |
| Battery Hot    | Акумулятор занадто гарячий; знизьте температуру або вимкніть пристрій, щоб уникнути пошкодження акумулятора                          |

Продовження таблиці 3.15

| Відображення | Опис  |
|--------------|---|
| Reboot Req   | Потрібне перезавантаження терміналу   |
| Critical Err | Апаратна помилка спричинила примусове вимкнення терміналу                       |
| Powering Off | Відображається, коли Hughes 4200 вимикається                                    |
| Rebooting... | Термінал перезавантажується   |
| Resetting... | Термінал скидається до параметрів за замовчуванням                              |
| Upgrading... | Відбувається оновлення програмного забезпечення терміналу                       |
| Factory Mode | Термінал перебуває в тестовому режимі і не може бути використаний               |
| Attach Fail  | Термінал не вдалося підключити до мережі  |
| GPS Comm Err | Термінал не зміг зв'язатися з приймачем GPS                                     |
| HW Failure   | Термінал зіткнувся з апаратною несправністю і не може продовжити функціонування |

### 3.11 Досвід забезпечення супутниковим зв'язком під час проведення бойових дій

Досвід проведення бойових дій довів особливу значимість супутникового зв'язку, коли відсутня можливість розгортання повнофункціональної польової системи зв'язку.

В багатьох випадках засоби супутникового зв'язку залишались єдиними засобами зв'язку, які дозволяють забезпечити управління військами (силами), особливо в початковий період їх розгортання на непідготовленому оперативному напрямку.

Розгорнута повнозв'язна підсистема супутникового зв'язку, що забезпечує стійкий зв'язок між пунктами управління усіх ланок та доведена до окремих ротно-тактичних груп та блок-постів (рис. 3.51). Основу існуючої підсистеми супутникового зв'язку складають станції супутникового зв'язку та портативні термінали супутникового зв'язку комерційного призначення.

Вищезазначені термінали встановлені в командно-штабні машини Р-142, Р-145, комплексні апаратні зв'язку П-258-60К (П-238ТК), входить до складу радіорейної станції Р-414МУ (А2М1) та “закриваються” сучасною апаратурою криптографічного захисту інформації (КЗІ). Такий варіант організації зв'язку дозволив організувати єдине інформаційне середовище в інтересах підрозділів під час бойових дій.

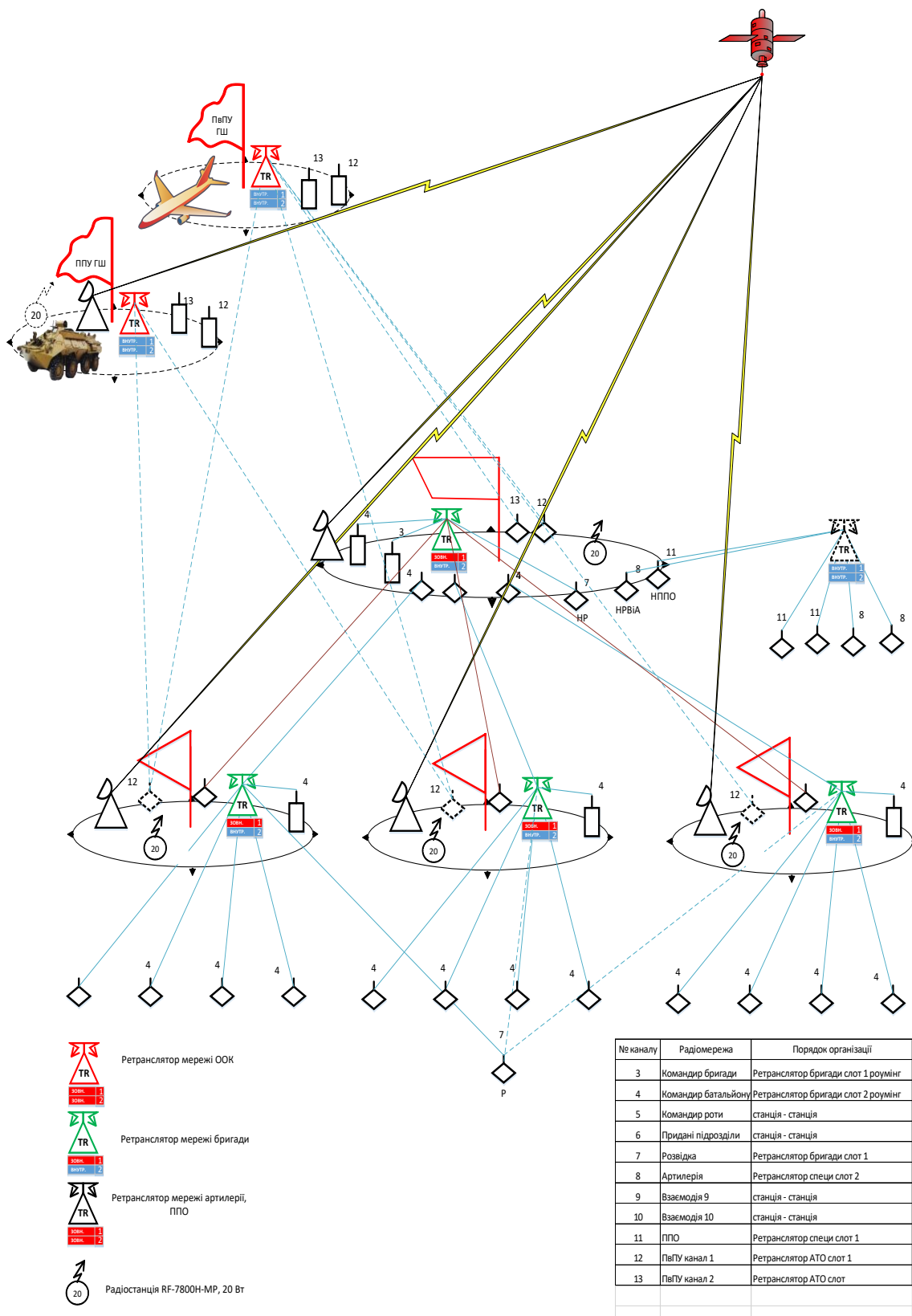


Рисунок 3.51 – Варіант схеми організації зв'язку під час бойових дій

Досвід застосування супутникового зв'язку під час бойових дій показав ряд переваг в порівнянні з іншими родами зв'язку, а саме:

- ✓ висока стійкість та якість зв'язку;
- ✓ висока мобільність, можливість оперативного розгортання земних станцій супутникового зв'язку безпосередньо в районах дислокації військових частин та підрозділів;
- ✓ мінімальні витрати (техніки й особового складу) при організації супутникових радіоліній;
- ✓ можливість розміщення земних станцій супутникового зв'язку в складках місцевості (в ущелинах, ярах), укриття їх за нерівностями рельєфу земної поверхні (горбами, горами) і штучними перешкодами (будівлями, спорудами), що забезпечує підвищення розвідзахищеності пунктів управління, зниження ефективності дії засобів створення радіоелектронних завад і додатковий захист від вогневого ураження;
- ✓ можливість сумісного використання ресурсу супутників зв'язку для вирішення завдань управління військами в стратегічній, оперативній і тактичній ланках управління;
- ✓ незначна залежність вартості каналів супутникового зв'язку від їх протяжності.

Система супутникового зв'язку, апаратура КЗІ та інше телекомунікаційне обладнання в основному забезпечували виконання поставлених завдань по зв'язку, проте мали місце проблемні питання й недоліки, які необхідно враховувати:

- ✓ відсутність можливості забезпечення супутниковим зв'язком під час руху;
- ✓ повна залежність системи супутникового зв'язку від оператора (власника) надання послуг;
- ✓ використання комерційного обладнання комплектів супутникового зв'язку, що не передбачає їх використання у польових умовах;
- ✓ використання системи супутникового зв'язку дало можливість забезпечити органи управління криптографічно захищеним і відкритим телефонним зв'язком та передачею даних;
- ✓ при переміщенні деяких комплектів станцій супутникового зв'язку з району в якому вони були вперше активовані в інші географічні райони (змінюється тип променя який використовується), потрібно проводити повторну активацію даних комплектів в даній місцевості для

чого потрібно робити запит коду активації та узгоджувати дії з компанією “DataGroup” (всі запити проводились як правило з використанням особистих засобів мобільного зв'язку);

✓ обладнання зовнішнє радіочастотне: супутникова антена (рефлектор), прийомо-передавач моделі RT4000N-010, згідно ТТХ, може експлуатуватися при температурі навколишнього середовища до +55°C, при чому показник “Temperature” (стан робочої температури Tria) в опції “TRIA Status” на 10–15°C вищий від реальної температури навколишнього середовища. При показанні “Temperature: +60°C” спостерігались зриви зв'язку (особливо актуально при організації зв'язку в період спеки);

✓ обладнання внутрішнє: супутниковий модем SurfBeam 2, комутатор D-Link DES-1005A, роутер Mikrotik, комутатор AT-FS716, VoIP шлюз Cisco SPA112, телефонний апарат EUROLINE SH-3 та інше розраховано на експлуатацію в опалюваному приміщенні, так як має в своїх характеристиках – діапазон робочих температур від 0°C до +40°C, що унеможливорює стійку роботу обладнання при температурах нижче 0°C та вище +40°C, та істотно впливає на швидкість встановлення зв'язку;

✓ супутниковий модем SurfBeam 2 та телекомунікаційне обладнання, а саме, комутатор D-Link DES-1005A, маршрутизатор Mikrotik, VoIP шлюз Cisco SPA112 статично не захищено, конструктивно виконано в пластмасовому корпусі та має неекрановані мережні LAN-ланцюги;

✓ більшість комплектів станцій супутникового зв'язку не укомплектовані заземлюючим обладнанням (колом заземлення та кабелем заземлення);

✓ антена станції супутникового зв'язку пофарбована в білий колір, що є демаскуючим фактором при візуальному спостереженні противника;

✓ антенний пост, який поставляється в комплекті станції, призначений для кріплення до стіни та не забезпечує надійне кріплення при розміщенні антени на поверхні землі, що призводить до необхідності постійної настройки антени під час вітру та зливи;

✓ для оперативного розгортання антенного обладнання станції супутникового зв'язку силами підрозділів виконувались виготовлення жорстких піддонів для опори інакше час розгортання зavelикий в умовах які потребують швидкого розгортання;

✓ мали місце випадки виходу з ладу високочастотного кабелю у наслідок інтенсивної експлуатації (багаторазове змотування та розмотування, роз'єми не призначені для багаторазового використання).



Рекомендації щодо візуального та звукового маскування терміналу супутникового зв'язку та станції електроживлення наведено на рис. 3.52–3.55.

*Апаратура КЗІ та телекомунікаційне обладнання:*

- ✓ постійно спостерігалась нестабільна робота апаратури КЗІ при погіршенні погодних умов (рівень прийомного сигналу менше ніж 9 dB);
- ✓ спостерігалось періодичне зависання апаратури КЗІ при температурі навколишнього середовища вищій за 35°C;
- ✓ апаратура КЗІ, комутатор АТ-FS716, ПК потребують надійного заземлення, при чому місце приєднання кабелю заземлення до апаратури не визначено;
- ✓ мали місце випадки виходу з ладу портів на VoIP шлюзі Cisco SPA112 із-за використання неекранованих кабелів (переважно під час грози);
- ✓ мали місце випадки виходу з ладу блоків живлення супутникового модему, комутатора (D-Link DES-1005A), маршрутизатора (Mikrotik), VoIP шлюзу (Cisco SPA112) у зв'язку з відсутністю мережевого фільтра та стабілізатора напруги;

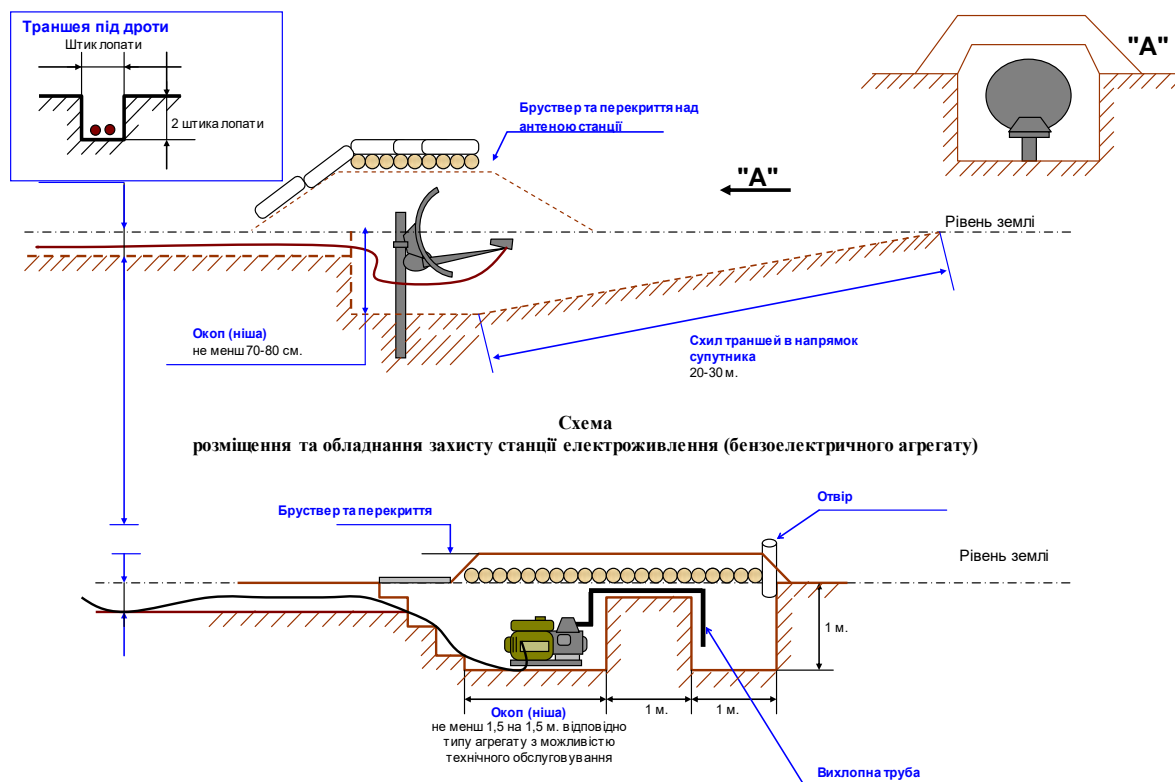


Рисунок 3.52 – Спосіб візуального маскування антени системи супутникового зв'язку та станції електроживлення



Рисунок 3.53 – Маскування антени системи супутникового зв'язку



Рисунок 3.54 – Спосіб зменшення розповсюдження звуку працюючого агрегату





Рисунок 3.55 – Накриття працюючого агрегату

- ✓ використання роз'ємів типу RJ-45 та RJ-11 приводило до частих зрывів у забезпеченні зв'язку за причинами механічних пошкоджень;
- ✓ кількість адрес, які видає маршрутизатор Mikrotik (всього 5), не завжди дозволяє проводити нарощення системи (підключення додаткового обладнання (шлюзів, робочих місць які потребують окрему IP адресу);
- ✓ використання лише 2-х портових VoIP шлюзів у комплекті станції супутникового зв'язку не завжди забезпечувало одночасну та повноцінну роботу посадовим особам пункту управління.

*Живлення системи супутникового зв'язку Tooway:*

- ✓ деякі комплекти станцій супутникового зв'язку не укомплектовані засобами, що забезпечують безперебійне живлення (наявні засоби, що забезпечують безперебійне живлення (Eaton EN 600H) для нормальної роботи потребували додаткового встановлення стабілізатора напруги в діапазоні від 160В до 280В, у разі його відсутності виходили з ладу так як в польових умовах мали місце значні перепади напруги);
- ✓ більшість станцій не укомплектовані інвертором з 27В постійного струму на 220В змінного струму, що унеможливило забезпечення резервного електроживлення для забезпечення зв'язку, при проведенні технічного обслуговування дизель-генератора;

✓ в комплекті дизель-генераторів повітряного охолодження (FGD 6500E 380/220 max 4,8 кВт (4,4 кВт)) не передбачено обладнання для заземлення та обладнання для захисту від атмосферних впливів;

✓ із-за несвоєчасного та неправильного технічного обслуговування дизель-генераторів мали випадки виходу їх з ладу (заміна (долив) мастила того яке було у наявності замість мастила специфікації SAE 10W30; не своєчасна заміна повітряного та масляного фільтрів, які повинні мінятися через кожні 100 годин роботи, або в міру забруднення (безперервна робота дизель-генератора більше 8 годин).

*Перспективи розвитку засобів військового супутникового зв'язку:*

✓ закупівля (розробка) антенного пристрою для забезпечення супутникового зв'язку під час руху;

✓ вдосконалення (розробка, модернізація) комплекту станцій супутникового зв'язку та телекомунікаційного обладнання військового призначення;

✓ закупівля центральної станції супутникового зв'язку (HUB) та оренда частотного ресурсу супутника ретранслятора;

✓ створення Національної системи супутникового зв'язку;

✓ створення засобів супутникового зв'язку, які працюють через центральну станцію – топологія “зірка”;

✓ створення засобів супутникового зв'язку з можливістю використання в мережах з топологією “кожен з кожним”;

✓ впровадження та створення новітніх засобів і комплексів супутникового зв'язку вітчизняного та закордонного виробництва, в тому числі подвійного призначення:

✓ перевізні станції супутникового зв'язку з можливістю автоматичного наведення та супроводження супутника, які встановлюються на об'єктах, колісних та гусеничних шасі;

✓ перевізні станції супутникового зв'язку контейнерного типу на базі ударостійких, герметичних контейнерів, масогабаритні показники яких дозволяли б переміщати їх особовим складом;

✓ переносні станції супутникового зв'язку [19].

### **Питання для самоконтролю до розділу 3**

1. Назвіть призначення та основні технічні характеристики супутника зв'язку Ka-Sat.
2. Назвіть призначення та основні технічні характеристики системи супутникового зв'язку Тоoway.
3. Розкрити склад та можливості системи супутникового зв'язку Тоoway.
4. Призначення основних складових елементів системи супутникового зв'язку Тоoway.
5. Привести можливості супутникового модему RM4100N.
6. Назвіть порядок визначення номера променя покриття, кута місця (елевації), азимуту.
7. Яким чином відбувається вибір місця установки антени?
8. Назвіть порядок юстування антени.
9. Назвіть порядок налаштування модему.
10. Які дії потрібно виконати для активація терміналу?
11. Приведіть схему підключення основного обладнання супутникового терміналу Тоoway.
12. Місце в системі зв'язку терміналу супутникового зв'язку Starlink?
13. Призначення, технічні характеристики та можливості терміналу супутникового зв'язку Starlink?
14. Склад комплекту терміналу супутникового зв'язку Starlink.
15. Особливості розміщення терміналу супутникового зв'язку Starlink на місцевості.
16. Особливості експлуатації терміналу супутникового зв'язку Starlink.
17. Яка максимальна відстань розміщення обладнання користувача від терміналу супутникового зв'язку Starlink?
18. Призначення, технічні характеристики та можливості системи персонального супутникового зв'язку Thuraya.
19. Космічний сегмент та характеристика космічного апарату системи Thuraya.
20. З яких систем складається підсистема корисного навантаження супутника Thuraya.
21. Що представляють собою абонентські термінали Thuraya.
22. Призначення, технічні характеристики та можливості системи супутникового зв'язку Inmarsat.
23. Які послуги надаються системою супутникового зв'язку Inmarsat.

24. Призначення, технічні характеристики та можливості системи супутникового зв'язку Iridium.

25. Основні параметри орбітального групування системи супутникового зв'язку Iridium.

26. З яких сегментів складається система супутникового зв'язку Iridium.

27. Призначення, технічні характеристики та можливості системи супутникового зв'язку Hughes 4200.

28. Досвід забезпечення супутниковим зв'язком під час проведення бойових дій.

29. Маскування антени системи супутникового зв'язку на місцевості.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

---

1. Minoli Daniel. Innovations in satellite communication and satellite technology : the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP: New York: Secure Enterprise Systems Inc, 2015. 420p.
2. Staff, “Geostationary, LEO, MEO, HEO Orbits Including Polar and Sun-Synchronous orbits with Example System and a brief section on Satellite History”, 2001, <http://www.geo-orbit.org>.
3. Satellite Internet Inc., “Satellite Physical Units and Definitions”, <http://www.satellite-internet.ro/satellite-internet-terminology-definitions.htm>.
4. D. Minoli, “Satellite Transmission Systems”, Telecommunication Technologies Handbook, First Edition, Artech House, 1991.
5. D. Jefferies, “Microwaves: Satcoms Applications”, MSc in Satcoms Notes, University of Surrey, Department of Electronic Engineering, School of Electronics and Physical Sciences, Guildford, Surrey, UK, GU2 7XH, 18th March 2004.
6. Agilent Technologies, “Digital modulation in Communications Systems – An introduction”, Application note 1298, march 14, 2002, Doc. 5965-7160E, 5301 Stevens Creek Blvd, Santa Clara, CA, 95051, United States.
7. Staff, “An Introduction to Earth Stations”, Focal point 2007, <http://focalpoint-consulting.com>. 1 bis rue Jasmin, 31800 ST GAUDENS, France.
8. J. E. Laube, Hughes Net, “Introduction to the Satellite Mobility Support Network, Hughes Net User Guide”, 2005–2007.
9. Staff, “The View from Jupiter: High-Throughput Satellite Stems”, White Paper by Hughes, July 2013. Retrieved at [www.hughes.com/resources/the-view-from-jupiter-high-throughput-satellite-systems](http://www.hughes.com/resources/the-view-from-jupiter-high-throughput-satellite-systems).
10. ETSI TR 102 376 v1.1.1 (2005-02): Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting;

Interactive Services; News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).

11. Morello A., Mignone V. DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-band Services. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 1, January, 2006.

12. Sheriff R. E., Fun Y. H. Mobile Satellite Communication Networks. – John Wiley and Sons, Ltd Baffin's Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, England, 2001.

13. Breynaert D., D'Oreye M. Analysis of the bandwidth efficiency of DVB-S2 in a typical data distribution network. <http://www.newtec.eu/>

14. Шолудько В.Г., Єсаулов М.Ю., Вакуленко О.В., Гурський Т.Г., Фомін М.М. Організація військового зв'язку: навчальний посібник. К.: ВІТІ, 2017. 280 с.

15. Двухсторонний спутниковий Інтернет от Тоoway. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://satsis.org.ua/res/print:page,1,6805-dvuhstoronniy-sputnikovyy-internet-ot-tooway.html>. 20.05.2022.

16. Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем: навчальний посібник. К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2004. 220 с.

17. Інмарсат. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.upwiki.one/wiki/Inmarsat>. 15.04.2022.

18. Розробка та дослідження системи супутникового радіозв'язку стандарту Iridium [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uchika.in.ua/rozrobka-ta-doslidjennya-sistemi-suputnikovogo-radiozvyazku-st.html?page=3>. 15.04.2022.

19. Збірник бойового досвіду застосування Військ зв'язку Збройних сил України під час проведення антитерористичної операції. К.: ВІТІ, 2015. 59 с.



