

Міністерство освіти і науки України  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
Кафедра мобільних та відеоінформаційних технологій



## **СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ**

Навчальний посібник

Київ – 2025

*Схвалено до друку вченою радою  
Державного університету інформаційно–комунікаційних технологій*

*Рецензенти:*

**Зіатдінов Юрій Кашафівіч**, доктор технічних наук, професор, директор відокремленого структурного підрозділу «Київський фаховий коледж комп'ютерних технологій та економіки Національного авіаційного університету», Заслужений працівник освіти України, Дійсний член (Академік) Аерокосмічної Академії України.

**Бутко Ігор Миколайович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комунікаційних технологій, ЗВО «Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая».

**Галаган Н.В., Блаженний Н.В.** Сучасні супутникові системи. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, ФОП Білецький Р.Г., 2025. – 80 с.

**ISBN 978-617-853-019-8**

Навчальний посібник розроблено згідно навчальної програми з дисципліни «Супутникові системи зв'язку і навігації», що викладається для студентів освітньо–кваліфікаційних рівнів «Бакалавр» спеціальності G5 (172) Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка; спеціалізації “Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення”.

Навчальний посібник містить стисле викладення теоретичного матеріалу, необхідного для підготовки до практичних занять та підсумкового контролю студентів Державного університету інформаційно–комунікаційних зазначеної спеціальності.

Посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які навчаються за спеціальностями з напрямку “Телекомунікації”, а також може бути корисний для аспірантів, викладачів навчальних закладів відповідних спеціальностей, фахівців, які обслуговують телекомунікаційні мережі зв'язку.

**ISBN 978-617-853-019-8**

## ЗМІСТ

|                                                                    | Стор. |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| ВСТУП .....                                                        | 5     |
| 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....        | 6     |
| 1.1 Призначення та принцип дії систем супутникового зв'язку .....  | 6     |
| 1.2 Історія супутникового зв'язку.....                             | 8     |
| 1.3 Класифікація систем супутникового зв'язку .....                | 9     |
| 1.4 Орбіти. Класифікація орбіт .....                               | 10    |
| 2 СТРУКТУРА СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....                     | 18    |
| 2.1 Загальна структура ССЗ.....                                    | 18    |
| 2.2 Наземні станції (ЗС) супутникових систем зв'язку.....          | 21    |
| 2.2.1 Малі ЗС.....                                                 | 22    |
| 2.2.2 Бортові ретранслятори ССЗ.....                               | 23    |
| 2.3 Частоти супутникового зв'язку.....                             | 24    |
| 2.4 Протоколи супутникових мереж.....                              | 26    |
| 3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТА ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ..... | 28    |
| 3.1 Багатостанційний доступ.....                                   | 28    |
| 3.2 Особливості використання супутникових каналів.....             | 31    |
| 3.3 Передавання сигналів різної форми.....                         | 32    |
| 3.4 Методи комутації і передачі даних.....                         | 32    |
| 3.5 Особливості супутникових систем зв'язку .....                  | 34    |
| 4 СИСТЕМИ ФІКСОВАНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....                   | 35    |
| 4.1 Системи широкомовлення та доступ в Інтернет.....               | 35    |
| 4.2 Технології для VSAT мереж.....                                 | 38    |
| 4.3 Структура станції VSAT.....                                    | 39    |
| 4.4 Типи терміналів VSAT .....                                     | 40    |
| 4.5 Архітектура мереж VSAT.....                                    | 40    |
| 5 СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ.....                    | 44    |
| 5.1 Мобільний радіотелефонний супутниковий зв'язок.....            | 44    |
| 5.2 Системи Турая, Globalstar, Ірідіум.....                        | 46    |
| 6 МІЖНАРОДНІ КОНСОРЦІУМИ В ССЗ.....                                | 50    |
| 6.1 Intelsat .....                                                 | 50    |
| 6.2 Eutelsat.....                                                  | 50    |
| 6.3 Inmarsat.....                                                  | 51    |
| 6.4 Інтерсупутник.....                                             | 53    |
| 7 СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ.....                              | 55    |
| 7.1 Поняття про супутникові радіонавігаційні системи.....          | 55    |
| 7.2 Будова GPS і ГЛОНАСС.....                                      | 57    |
| 7.2.1 Космічний сегмент.....                                       | 57    |
| 7.2.2 Контрольний сегмент.....                                     | 59    |

|       |                                                                                              |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2.3 | Сегмент користувача.....                                                                     | 60 |
| 7.3   | Диспетчерські інформаційні системи.....                                                      | 62 |
| 7.4   | Розвиток міжнародних навігаційних систем.....                                                | 63 |
| 8     | СИНХРОНІЗАЦІЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ПО СУПУТНИКОВИМ СИГНАЛАМ.....                          | 65 |
| 8.1   | Супутникові системи і мережі синхронізації .....                                             | 65 |
| 8.2   | Синхронізація цифрових систем зв'язку по сигналах супутникових радіонавігаційних систем..... | 68 |
| 9     | ГЛОБАЛЬНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА STARLINK                                                       | 71 |
| 9.1   | Технічні характеристики супутникової системи Starlink                                        | 73 |
| 9.2   | Користувацькі термінали та наземні станції супутникової системи Starlink.....                | 75 |
|       | Заклучення.....                                                                              | 78 |
|       | Література.....                                                                              | 79 |

## ВСТУП

Сучасні супутникові системи використовуються для передачі різних сигналів на великі відстані.

З моменту своєї появи супутникові системи почали стрімко і невпинно розвиватися, а з розвитком апаратури, вдосконаленням методів передачі сигналів відбувся перехід від використання окремих ліній супутникового зв'язку до локальних і глобальним систем.

Високі темпи розвитку супутникових інформаційних технологій, невпинне зростання інтенсивності інформаційних потоків і збільшення обсягів створеної та оброблюваної інформації потребує безперервного відновлення знань і підвищення кваліфікації фахівців, що працюють у сфері супутникових інформаційних технологій та супутникових інформаційних систем.

Для цього, зокрема, потрібно постійно вдосконалювати навчально–методичне наповнення дисциплін, що вивчаються за напрямками спеціальностей технічних вишів.

Важливою особливістю даного навчального посібника є систематизований виклад використання супутникових інформаційних технологій, окреслення спільних та відмінних їх ознак та розкриття їхньої функціональності для студентів. Навчальний посібник доповнює наявну навчальну літературу з курсу навчальної дисципліни «Супутникові системи зв'язку і навігації» за спеціальністю 172 – Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка для студентів вищих навчальних закладів України, а також може бути корисним для аспірантів, викладачів навчальних закладів відповідних спеціальностей, фахівців, які обслуговують інформаційно–комунікаційні мережі зв'язку.

Автори прагнуть зорієнтувати студентів і слухачів курсу «Супутникові системи зв'язку і навігації» у світі сучасних інформаційних технологій та супутникових систем і надати необхідний теоретичний та практичний базис знань у даній сфері.

Тому у викладеному матеріалі посібника достатньо глибоко розкрито зміст фундаментальних понять супутникових інформаційних технологій, питання побудови систем супутникового зв'язку, методи обробки та передачі сигналів у супутникових системах фіксованого та мобільного супутникового зв'язку, синхронізація цифрових систем зв'язку по супутниковим сигналам, напрямки та перспективи розвитку послуг супутникового зв'язку та мовлення. Значна увага приділена використанню систем супутникового зв'язку для визначення навігаційних параметрів рухомих засобів, що дасть змогу швидко та якісно розв'язувати практичні завдання.

Теоретичний матеріал посібника максимально доповнений прикладами й ілюстраціями; для кожного розділу сформульовано контрольні запитання для перевірки якості засвоєння знань.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Призначення та принцип дії систем супутникового зв'язку

*Супутниковий зв'язок* – один з видів радіозв'язку, заснований на використанні штучних супутників Землі (ШСЗ) в якості ретрансляторів.

Одним з найважливіших практичних застосувань ШСЗ є здійснення дальнього зв'язку (рис.1.1), при якому штучний супутник Землі відіграє роль ретрансляційної станції, що розміщена на висоті від сотень до десятків тисяч кілометрів. Зона видимості ретранслятора при цьому – майже половина Земної кулі.

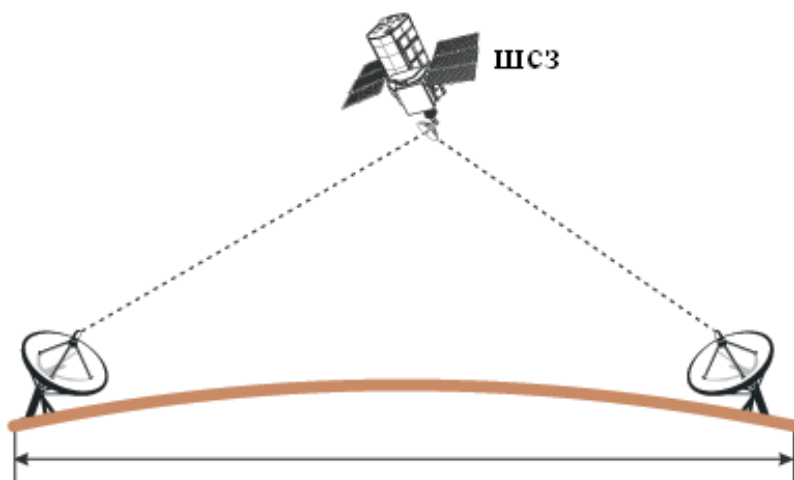


Рисунок 1.1 – Принцип дії системи супутникового зв'язку

Супутниковий зв'язок здійснюється між земними станціями (ЗС), які можуть бути стаціонарними або рухомими.

Оскільки супутниковий зв'язок є радіозв'язком, для передачі через супутник сигнал повинен бути промодульованим. Модуляція відбувається на земній станції. Модульований сигнал переноситься на потрібну частоту, підсилюється та надходить на передавальну антену [1].

Звичайний (нерегенеративний) супутник, прийнявши сигнал від однієї наземної станції, переносить його на іншу частоту, підсилює й передає іншій наземній станції. У супутнику може бути кілька незалежних каналів, що здійснюють ці операції, кожен з яких працює в певному діапазоні частот (ці канали обробки називаються **транспондерами**).

Регенеративний супутник демодулює прийнятий сигнал та знову модулює його. Завдяки цьому помилки виправляються два рази: на супутнику та на приймальній земній станції. Недоліком цього методу є складність, висока вартість супутника та наземного обладнання.

В залежності від призначення системи супутникового зв'язку (ССЗ) пункти зв'язку можуть бути розташовані на поверхні Землі, в атмосфері або космосі. У кожному з цих пунктів встановлюється приймально–передавальна радіостанція (одноканальна або багатоканальна), а на супутниках – супутникові ретранслятори (СР), які приймають радіосигнали від одних абонентів і ретранслюють їх до інших. Для супутникових ліній зв'язку використовується сантиметровий діапазон хвиль. У найпростішому випадку ретрансляція зводиться до посилення потужності вхідних сигналів і перенесення їх спектрів на інші несучі частоти. Проте, у ряді супутникових систем в СР здійснюється складніша обробка сигналів з метою зменшення перехресних перешкод між сигналами від різних систем і підвищення завадостійкості ССЗ.

У загальному випадку, для забезпечення якісного зв'язку між усіма пунктами (абонентами) супутникові ретранслятори доводиться розміщувати на кількох супутниках, що обертаються на різних орбітах [2].

Системи супутникового зв'язку використовуються для передавання наступних видів інформації :

- програм телебачення і звукового мовлення;
- телефонних, факсимільних повідомлень, відеоконференцій, цифрових передач – симплексних або дуплексних за своїм характером.

Завдяки використанню в ССЗ цифрових методів передачі забезпечується висока завадостійкість, стабільність параметрів каналів, гнучкість при побудові систем різної конфігурації і модернізації режимів їх роботи, з'являється можливість більш повного використання пропускнуої спроможності каналів і підвищення техніко–економічних показників ССЗ.

Ефективним засобом підвищення пропускнуої спроможності супутникових систем при забезпеченні телефонного зв'язку є реалізація оптимальних методів модуляції, кодування, багатостанційного доступу, а також, статистичне ущільнення, що базується на використанні природних пауз у розмові двох абонентів.

Системи супутникового зв'язку мають цілий ряд **переваг**:

- повна незалежність від операторів наземних мереж;
- висока надійність, що досягає 99,9%;
- широкий спектр послуг (дані, голос, відео).

Серед **недоліків** супутникових мереж традиційно називаються можливість перехоплення радіосигналу та вплив погодних умов на якість зв'язку [3]. Проте, для захисту радіосигналу в супутникових системах використовуються потужні методи кодування сигналу, що робить перехоплення практично неможливим. Середня ж доступність каналу зазвичай складає не менше 99,9%.

При побудові систем супутникового зв'язку слід враховувати наступні важливі аспекти:

– **технічний аспект** – передбачає створення та виведення на орбіту декількох супутників–ретрансляторів з вузько направленими антенами, створення наземних передавальних пунктів, виробництво простих приймальних пристроїв масового використання. Рішення такого технічного завдання потребує використання найсучасніших технологій і засобів космічної техніки.

– **економічний аспект** – економічна оптимізація дозволить зробити наземні засоби зв'язку та розповсюдження телевізійних програм найбільш ефективними і недорогими і, тим самим, дозволить знизити витрати на створення усієї системи.

– **міжнародний**. Під час створення практично будь-якої національної системи супутникового зв'язку не можна локалізувати її діяльність лише в межах зони обслуговування. Найбільш важлива та необхідна міжнародна координація супутникових систем, яка передбачає чітко сплановане використання геостаціонарної орбіти та регламентує кількість параметрів штучних супутників землі та земних станцій, які впливають на електромагнітну сумісність з іншими службами і системами.

## 1.2 Історія супутникового зв'язку

Початком історії систем супутникового зв'язку можна вважати 1945 рік, коли американський письменник-фантаст Артур Кларк, описав в одному з журналів супутникову технологію, ідентичну сучасній. Але, перші кроки до створення сучасних супутникових технологій були зроблені трохи пізніше.

4 жовтня 1957 в СРСР було запущено перший штучний супутник Землі. В січні 1958 року в США запустили свій перший супутник – Експлорер, а в грудні 1958 – перший супутник зв'язку.

Взагалі, виділяють чотири етапи розвитку супутникових систем зв'язку:

I етап – **з середини 60-х років ХХ століття** – запуск перших супутників зв'язку, початок комерційного використання супутників-ретрансляторів для багатоканального зв'язку і передачі радіо- та телепрограм;

II етап – **70-ті роки** – створення систем мобільного супутникового зв'язку і супутникового телемовлення колективного користування;

III етап – **80-ті роки** – зародження технології VSAT (Very Small Aperture Terminal – термінал з малими розмірами антени);

IV етап – **з кінця 90-х років** – початок експлуатації глобальних супутникових систем зв'язку для передачі даних та мультимедіа.

В незалежній Україні розвиток космічної галузі розпочався створенням 29 лютого 1992 року Указом Президента України Національного космічного агентства України (з 2011 року – Державне космічне агентство України – ДКАУ).

Це дозволило нашій країні розпочати формування власної державної політики в сфері дослідження та використання космічного простору.

У серпні 1995 року вперше під юрисдикцією України здійснено запуск супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1».

З 19 листопада по 5 грудня 1997 року здійснено політ у космос першого космонавта України Леоніда Каденюка.

На сьогоднішній день в Україні функціонують наступні провайдери супутникового зв'язку: Інфоком, УкрСат, Space Gate, Турая, Елсаком.

Власні національні системи супутникового зв'язку мають багато країн світу, але найбільше поширення одержав супутниковий зв'язок у США (близько 30 державних і приватних систем, у тому числі військові). Досить багато існує

російських систем супутникового зв'язку, серед них: "Тундра", "Молнія", "Сигнал", "Гонець", "Ямал" та ін.

### 1.3 Класифікація систем супутникового зв'язку

Системи супутникового зв'язку розрізняють по мірі глобальності і універсальності обслуговування абонентів. Міра глобальності ССЗ характеризується приналежністю і розміром зони обслуговування, а універсальності – набором категорій абонентів і числом видів зв'язку, що надається [4].

За приналежністю ССЗ підрозділяються на міжнародні, національні, корпоративні. За зоною обслуговування ССЗ – на глобальні, регіональні, зонові (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Зони обслуговування супутникових систем

Глобальні – надають послуги над всією територією Землі. Наприклад: Globalstar, Inmarsat, Iridium, Starlink.

Регіональні – надають послуги над обмеженою територією земної поверхні. Наприклад: Турая, Спейс Гейт.

Вартість створення регіональних систем в 2–5 разів менша, ніж глобальних, за рахунок чого вони є більш привабливими для інвесторів.

Системи супутникового зв'язку можна також розділити на типи за їхнім призначенням. Так, існує поняття "служба супутникового зв'язку", уведене Регламентом Радіозв'язку. Відповідно, виділяють: Фіксовані супутникові служби, Мобільні супутникові служби, Радіомовні супутникові служби.

## 1.4 Орбіти. Класифікація орбіт

У космічному сегменті використовуються супутники–ретранслятори, що знаходяться на різних навколоземних орбітах в залежності від призначення системи.

**Орбіта** – траєкторія руху супутника.

Єдиної думки щодо класифікації орбіт немає. Почати хоча б з того, що немає однозначного розуміння межі, де закінчується повітряний простір і починається космос. Багато фахівців вважають, що космос починається з висоти 100 км над Землею. Проте, офіційні визначення та обґрунтування цієї межі відсутні [5].

Умовна класифікація орбіт представлена блок–схемою на рисунку 1.3. Наявність пунктирних ліній викликана неоднозначністю визначення майже всіх класів, в першу чергу середньовисотних і високих орбіт.

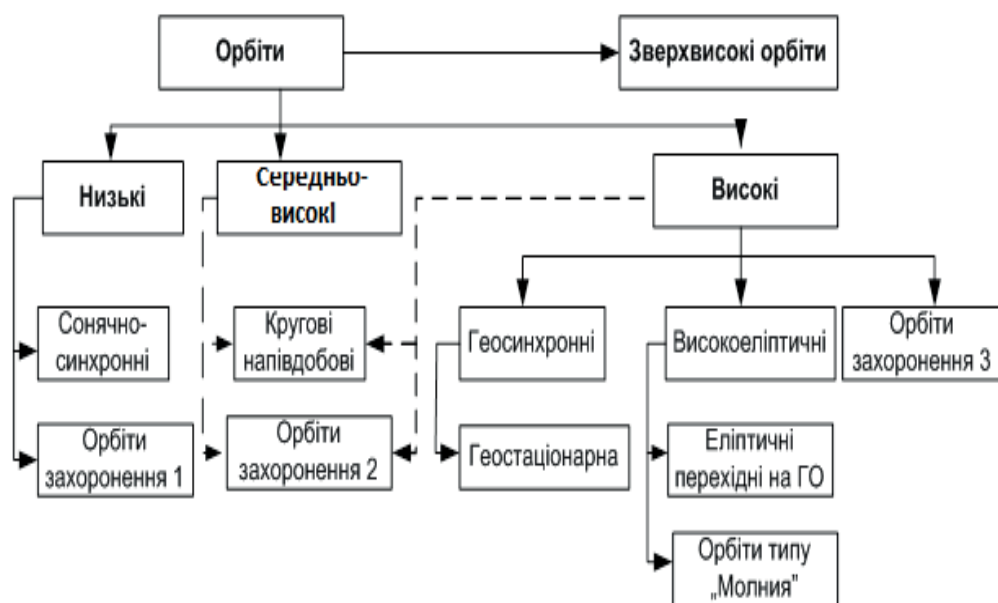


Рисунок 1.3 – Умовна класифікація орбіт

*Низькі орбіти* (LEO – Low Earth Orbits) – на висоті 100–2000 км (стандарт НАСА Національне управління США з аеронавтики і дослідження космічного простору (англ. National Aeronautics and Space Administration).

Супутник, що знаходиться на низькій орбіті, перебуває в зоні прямої видимості з певної точки земної поверхні лише протягом 8–12 хв. Тому, для забезпечення неперервного зв'язку необхідна велика кількість супутників, які взаємодіють за допомогою шлюзових станцій або станцій міжсупутникового зв'язку. Такі системи мають гарні енергетичні характеристики радіоліній. Приклади систем: Глобалстар, Ірідіум, Теледесік, Сигнал, Гонцев.

*Сонячно-синхронна орбіта* (SSO – Sun-Synchronous Orbits) – низька орбіта з попутним рухом, в якому площина орбіти процесує з тією ж швидкістю, з якою Земля обертається навколо Сонця. Космічний апарат на такій орбіті щодня спостерігає одну і ту ж освітленість Землі [6].

*Середньовисотні орбіти* (MEO – Medium Earth Orbits) присутні не у всіх класифікаціях експертів, але там, де вони мають місце, можуть охоплювати діапазони висот від 5000 до 10 000 км, від 1500 або 2000 до 20 000 км або до геостационарної орбіти, іноді це деяка область близько 20 000 км. Є й інші варіанти, тобто, у різних експертів немає єдиної думки щодо меж цього класу орбіт.

*Кругові напівсинхронні орбіти* (CSO – Circular Semisynchronous Orbits) історично використовуються навігаційними системами NAVSTAR, GPS, GLONASS, Galileo і характеризуються періодом обертання ШСЗ, рівним  $\sim 12$  год. Середня висота такої орбіти  $\sim 20\,200$  км. В деяких класифікаціях ці орбіти включаються до складу середньовисотних. Ця орбітальна область все більш інтенсивно експлуатується в міру заповнення її навігаційними космічними системами. До американської GPS (раніше NAVSTAR) і російської GLONASS додалися європейська Galileo і китайська BeiDou. Цей клас орбіт включає такі підкласи, як орбіти типу «Молнія» та перехідні еліптичні орбіти.

Орбіти типу «Молнія» – високоеліптичні орбіти з нахилом  $63 \dots 65^\circ$ , періодом близько 12 год і апогеєм у північній півкулі. Ці орбіти завжди використовувалися для забезпечення зв'язку і функцій раннього попередження про ракетний напад.

*Перехідні еліптичні орбіти* (GTO – Geosynchronous Transfer Orbit) з апогеєм на геостационарній орбіті і перигеєм в області низьких орбіт використовуються для переходу ШСЗ з низької орбіти на геосинхронну і, зокрема, на геостационарну. Ракети-носії (РН), що застосовуються для здійснення такого переходу, залишаються на цих орбітах після того, як корисний вантаж відокремиться і вийде на ДСО або іншу геосинхронну орбіту. Час існування таких супутників становить від місяця до більш, ніж 100 років.

*Високі орбіти* (НО — High Orbits) – мабуть, самий невизначений клас, так як для віднесення до нього можуть бути використані самі різні чинники. Наприклад, відсутність впливу атмосфери на рух ШСЗ, наявність помітних місячних і сонячних збурень, віддаленість від наземних засобів спостереження і т. д. Навіть в межах будь-якого з цих факторів існує значна невизначеність. Зокрема, верхня межа атмосфери – досить умовне поняття (500, 600, 700, 800 км ...?). При дослідженні впливу Місяця і Сонця на рух КА, до високих відносять орбіти, для математичного описування яких таким впливом знехтувати не можна. Це орбіти висотою понад 10 000 – 20 000 км (тут нижня межа вважається невизначеною). Більш того, вплив Місяця і Сонця і, навіть, сам характер цього впливу на рух ШСЗ істотно залежить від просторової орієнтації площини його орбіти щодо цих небесних тіл. З точки зору неможливості стійкого контролю руху ШСЗ наземною мережею, до високих відносять орбіти з періодом обертання  $> 3$  год. і, зокрема, високоеліптичні з перигеєм у південній півкулі. До речі, аналогічний підхід до визначення високих орбіт прийнятий в лабораторії

Лінкольна Массачусетського технологічного інституту, де орбіта вважається високою, якщо період її обертання перевищує 225 хв., що відповідає висоті 5000 км.

*Орбіта захоронення* (DO — Disposal Orbits) – орбіта, на яку здійснюється виведення ШСЗ після закінчення їх активної роботи. Також називається *орбітою існування*, областю виведення космічного об'єкта або зоною захоронення.

Для геостационарних супутників орбітою захоронення вважається орбіта, висота якої на 200 кілометрів перевищує висоту геостационарної орбіти. На неї відправляються космічні апарати, які відпрацювали свій термін з метою зменшення ймовірності зіткнень і звільнення місця на геостационарній орбіті.

За характером і висотою орбіти розрізняють 4 типи систем супутникового зв'язку:

– *Низькоорбітальні системи* (LEO – Low Earth Orbit) – із круговими орбітами висотою 100–2000 км (стандарт НАСА Національне управління США з аеронавтики і дослідження космічного простору (англ. National Aeronautics and Space Administration). У різних експертів верхня межа коливається від 1500 до 3000 км, рідко до 5000 км, але буває і 6000 км.

– *Середньоорбітальні* (MEO – Medium Earth Orbit) – із круговими орбітами від 5000 до 20000 км. Затримка розповсюдження сигналу складає приблизно 130 мс, і дозволяє використовувати такі системи для радіотелефонного зв'язку.

– *Високоорбітальні чи геостационарні* (GEO – Geostationary Earth Orbit) – із круговими екваторіальними орбітами висотою близько 40 000 км. При цьому період обертання супутника навколо Землі дорівнює 24 год. Тобто, супутник завжди знаходиться над певною точкою Землі. Перевагою таких систем є можливість покриття всієї земної поверхні невеликою кількістю супутників (від трьох). Основний недолік – великий час розповсюдження радіосигналів (затримка радіосигналу) [7]. Прикладами систем є: INMARSAT (міжнародна організація морського супутникового зв'язку), OmniTRACKS (північноамериканська система для передачі даних і визначення місця розташування), EUTELTRACKS (західноєвропейська з тими ж функціями), Mobilesat (австралійська система для мобільного і фіксованого зв'язку), "Сокіл" (російська).

– *Високоеліптичні* (HEO – Highly Elliptical Orbit) – з витягнутими еліптичними орбітами, що мають радіус перигею порядку тисячі кілометрів і радіус апогею порядку одного чи декількох десятків тисяч кілометрів. Приклади систем: Tundra, Molnia.

У загальному випадку, висоти орбіт системи супутникового зв'язку визначаються, виходячи з цілого ряду факторів, таких як: близькість радіаційних поясів Ван Алена, характеристики радіосигналу (затримка розповсюдження), розміри території обслуговування та ін.

Період обертання супутника навколо землі залежить від висоти орбіти, оскільки лінійна швидкість супутника повинна бути близькою до першої космічної (близько 8 км/с), щоб супутник не падав на землю. У таблиці 1.1 наведено деякі характеристики різних орбіт.

Таблиця 1.1 – Характеристики орбіт

| Період<br>обертання (год) | Кількість<br>обертів за добу | Висота кругової орбіти | Висота еліптичної орбіти (км) |         |
|---------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------|
|                           |                              |                        | апогей                        | перигей |
| 4                         | 6                            | 6750                   | 500                           | 1300    |
| 6                         | 4                            | 10750                  | 500                           | 21000   |
| 8                         | 3                            | 14250                  | 500                           | 28000   |
| 12                        | 2                            | 20325                  | 500                           | 40425   |
| 24                        | 1                            | 35875                  | 500                           | 71250   |

*Геостаціонарні орбіти* є найбільш популярними при створенні систем супутникового зв'язку. Площина цієї орбіти збігається з площиною екватора, а супутники знаходяться на висоті близько 36 000 км. Період обертання супутника становить 24 год на добу. Якщо напрямок його руху збігається з напрямком обертання Землі, то з поверхні Землі він здається нерухомим.

Ні при якому іншому поєднанні зазначених параметрів орбіти не можна домогтися нерухомості космічного апарата щодо наземного спостерігача. Антени станцій, що працюють з геостаціонарним супутником, не вимагають складних систем наведення і супроводу, а в разі необхідності можуть бути встановлені пристрої для компенсації невеликих збурень орбіти. Це дозволяє використовувати для зв'язку з супутником високоефективні фіксовані вузькоспрямовані антени. Зона видимості геостаціонарного супутника становить майже третину поверхні землі, що дозволяє з їх допомогою обслуговувати великі території. Для обслуговування практично всієї земної суші достатньо трьох геостаціонарних супутників, розміщених під кутом  $120^\circ$ . Відстань між земними станціями, що працюють через такий супутник, може сягати кількох тисяч кілометрів.

Завдяки цій обставині в даний час майже всі супутники зв'язку, призначені для комерційного використання, знаходяться на геостаціонарній орбіті. Приблизно в одній позиції на одній географічній довготі можуть перебувати кілька космічних апаратів, розташованих на відстані близько 100 км один від одного.

Супутникова лінія зв'язку з ретранслятором на геостаціонарній орбіті має ряд значних переваг:

- відсутність пристрою супроводу КА в антенній системі наземного комплексу;

- висока стабільність рівня сигналу в радіоканалі;

- відсутність ефекту Доплера;

- простота організації зв'язку в глобальному масштабі.

Недоліки:

- перенасиченість геостаціонарної орбіти на багатьох ділянках;

– неможливість обслуговування приполярних областей. Поблизу полюсів геостаціонарний КА видний під малим кутом місця, а біля самих полюсів не видний взагалі. Через малість кута місця відбувається затінення супутника місцевими предметами, збільшення шумової температури антени за рахунок теплових шумів Землі, підвищення рівня перешкод від наземних радіотехнічних засобів. Вже на широті  $75^\circ$  прийом утруднений, а вище  $80^\circ$  – майже неможливий. Однак, у широтному поясі від  $80^\circ$  пд.ш. до  $80^\circ$  пн.ш. проживає практично все населення Землі;

– велика відстань між супутником і земною станцією, в результаті чого відбувається значне загасання сигналу на лінії Земля–Космос, що посилює вимоги до чутливості приймачів і вихідної потужності передавачів. Крім того, на таких відстанях стає помітною затримка при поширенні сигналу, яка складає близько 0,25 с при одному стрибку (лінія Земля–Космос–Земля).

Високі еліптичні орбіти займають особливе місце серед інших орбіт. При куті нахилу близько  $65$  градусів, така орбіта відрізняється високою стабільністю в часі, що дозволяє значно знизити вагу космічного апарату за рахунок відмови від великих запасів палива для двигунів корекції.

Низькі орбіти залучають розробників тим, що за рахунок малої відстані між супутником і земною станцією втрати на лінії більш, ніж в тисячу разів менші, що дозволяє значно знизити вимоги до потужності передавачів і чутливості приймачів. З іншого боку, діаметр зони обслуговування складає близько 500 км, і кожен супутник знаходиться в зоні видимості земної станції близько 15–20 хвилин. Тому для організації безперервного зв'язку необхідно використовувати цілий флот низькоорбітальних супутників (не менше 48). Крім того, для роботи з супутниками, які низько пролітають, необхідно використовувати або малоефективні широко спрямовані антени, або вузькоспрямовані антени зі складними системами стеження за супутниками [8].

Середні орбіти займають проміжне положення між геостаціонарними і низькими і пропонують деяке компромісне рішення між двома цими системами.

Системи з середньовисотними КА забезпечують кращі характеристики обслуговування абонентів порівняно з геостаціонарними за рахунок збільшення робочих кутів місця і числа космічних апаратів, які знаходяться одночасно в полі зору наземного абонента. Так, радіовидимість двох супутників в системах Odyssey або ICO забезпечується в 95% добового часу.

Однією з умов, що впливають на вибір структури не геостаціонарного орбітального угруповання і обмежують застосування таких угруповань, є наявність просторових поясів заряджених частинок, захоплених магнітним полем Землі.

Схематичне розташування радіаційних поясів Ван Аллена наведено на рисунку 1.4. Перший стійкий пояс радіації високої інтенсивності ( $10000$  імп/с) розташований на висоті  $2000...9000$  км і до  $30^\circ$  в обидві сторони від екватора. Другий пояс радіації такої ж високої інтенсивності розташований на висотах  $13000...19000$  км і до  $50^\circ$  в обидві сторони від екватора.

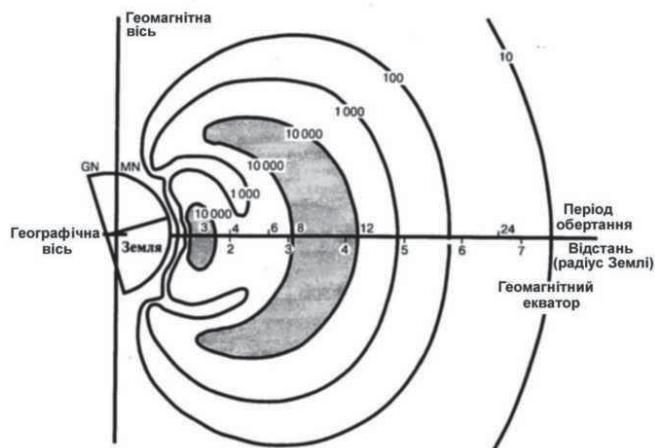


Рисунок 1.4 – Рівні радіації в зонах Ван Аллена (GN – географічна північ, MN – магнітна північ)

Середньовисотні супутники займають проміжне місце на орбіті. Їхня траса проходить між першим і другим поясами Ван Аллена, тобто в діапазоні висот 5000...15000 км. Вони створюють меншу зону обслуговування, ніж геостационарні КА. Тому для глобального охоплення з однократним покриттям найбільш населених районів Земної кулі і судноплавних акваторій необхідно мати 7...12 супутників.

Повна затримка розповсюдження сигналів радіозв'язку із застосуванням середньовисотних супутників не перевищує 130 мс, що дозволяє використовувати їх для персонального радіотелефонного зв'язку. Такі супутники виграють за енергетичними показниками порівняно з системами з більш високими орбітами, проте програють їм за тривалістю часу перебування КА в зоні радіовидимості ЗС, який не перевищує 1,5...2 годин.

Орбітальний ресурс середньовисотних космічних апаратів лише трохи менший, ніж у геостационарних. Період обертання навколо Землі для середньовисотних кругових орбіт складає близько 6 годин, з яких лише декілька хвилин КА перебувають в області тіні Землі, що значно полегшує роботу бортової системи електроживлення і дозволяє забезпечити термін служби КА до 12...15 років.

Системи з середньовисотними космічними апаратами забезпечують більш високі характеристики обслуговування абонентів за рахунок збільшення робочих кутів місця і числа КА, що одночасно знаходяться в зоні радіовидимості, а також прийнятну затримку часу надходження сигналів при проведенні сеансів зв'язку (до 130 мс).

В таблиці 1.2 наведено порівняльну характеристику систем, що використовують різні типи орбіт

Таблиця 1.2 – Характеристики систем, що використовують різні типи орбіт

| Тип орбіти                                                                      | GEO             | MEO                   | LEO                    |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| Висота орбіти, км                                                               | 36000           | 10355                 | 700–1500               |
| Кількість КА в орбітальному угрупованні при безперервному глобальному охопленні | 3               | 8–12                  | 48–66                  |
| Площа зони покриття для одного КА, в % щодо поверхні Землі (кут місця 5°)       | 34              | 25–28                 | 3–7                    |
| Час перебування КА в зоні радіовидимості                                        | Безперервне     | 1,5–2 год             | 10–15 хв               |
| Затримка при передачі мови:                                                     |                 |                       |                        |
| - регіональний зв'язок                                                          | не менше 500 мс | 80–130 мс             | 20–70 мс               |
| - глобальний зв'язок                                                            |                 | 250–400 мс            | 70–300 мс              |
| Час перемикання (хв):                                                           |                 |                       |                        |
| - з одного супутника на інший                                                   | не потрібен     | 50–60                 | 8–10                   |
| - з одного променя в інший                                                      | 10–15           | 5–6                   | 1,5–2,0                |
| Максимальний відносний доплерівський зсув                                       | $\pm 10^{-8}$   | $\pm 6 \cdot 10^{-6}$ | $\pm (1,8-2,4)10^{-5}$ |
| Кут місця на краю зони обслуговування (град)                                    | 5               | 25–30                 | 10–15                  |

В залежності від кута нахилу до площини екватора розрізняють наступні типи орбіт (рис.1.5):

- полярна орбіта,
- похила орбіта,
- екваторіальна орбіта.



Рисунок 1.5 – Типи орбіт КА

#### Основні характеристики орбіти:

- нахилення площини орбіти до площини екватора;
- висота перигею (нижча точка орбіти);
- висота апогею (вища точка орбіти).

Якщо орбіта кругова, то висота перигею й апогею рівні.

*Апогéй* (грец. *απογειος* – далекий від Землі) – точка еліптичної навколоземної орбіти небесного тіла, зазвичай Місяця або штучного супутника Землі, найбільше віддалена від центру Землі.

Навпаки, найближча до центру точка навколоземної орбіти зветься *перигей*.

Більшість відомих не геостаціонарних систем будується за принципом "кілець", кожне з яких складається з декількох рівномірно розміщених уздовж усієї орбіти супутників, що рухаються на таких навколоземних орбітах, які розташовані в одній площині і створюють на поверхні Землі пояс зв'язку.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що супутниковий зв'язок використовує у якості ретрансляторів?
2. Класифікація систем супутникового зв'язку по приналежності.
3. В якому році було запущено перший штучний супутник Землі?
4. Недоліки систем супутникового зв'язку.
5. Які бувають системи супутникового зв'язку?
6. Який діапазон хвиль використовується для супутникових ліній зв'язку?
7. Класифікація ССЗ по зоні обслуговування.
8. Переваги ССЗ.
9. Що таке орбіта?
10. Типи орбіт та їх характеристики.
11. Від яких факторів залежить висота орбіти?
12. Призначення геостаціонарної орбіти, її переваги та недоліки.
13. Як класифікуються орбіти в залежності від кута нахилу?
14. Характеристики орбіт.

## 2 СТРУКТУРА СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 2.1 Загальна структура ССЗ

Принцип дії систем супутникового зв'язку базується на використанні проміжного супутникового ретранслятора, через який забезпечується зв'язок між земними станціями (рис. 2.1).

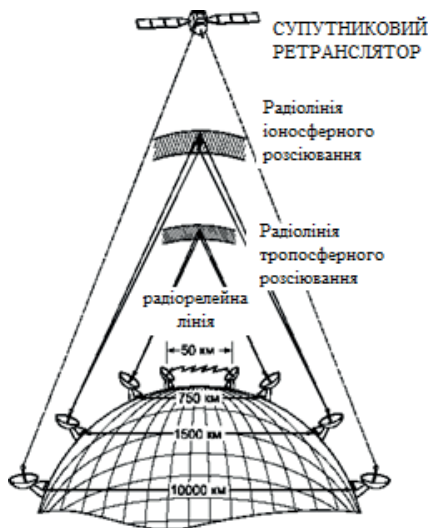


Рисунок 2.1 – Система супутникового зв'язку

В основі побудови супутникової системи зв'язку лежить ідея розміщення ретранслятора на космічному апараті. Рух КА тривалий час відбувається без витрат енергії, а енергопостачання всіх систем здійснюється від сонячних батарей. КА, що знаходиться на досить високій орбіті, здатний «охопити» дуже велику територію – близько третини поверхні Землі. Через його бортовий ретранслятор можуть зв'язуватися будь-які станції, що знаходяться на цій території. Принцип супутникового зв'язку полягає в ретрансляції апаратурою супутникового сигналу від передавальних наземних станцій до приймачів.

В системі супутникового зв'язку можна виділити чотири основних частини, кожна з яких охоплює розгляд певних питань (рис.2.2):

- космічний сегмент, де розглядаються питання проектування, розрахунку орбіти і запуску супутника;
- сигнальна частина – охоплює спектр частот, вплив відстані на організацію і підтримку зв'язку, джерела інтерференції сигналу, схеми модуляції і протоколи передачі;
- наземний сегмент – розміщення і конструкцію наземних станцій, типи антен, що використовуються для різних додатків, схеми мультиплексування, що забезпечують ефективний доступ до каналів супутника;
- користувацький сегмент, до якого належить абонентське устаткування.

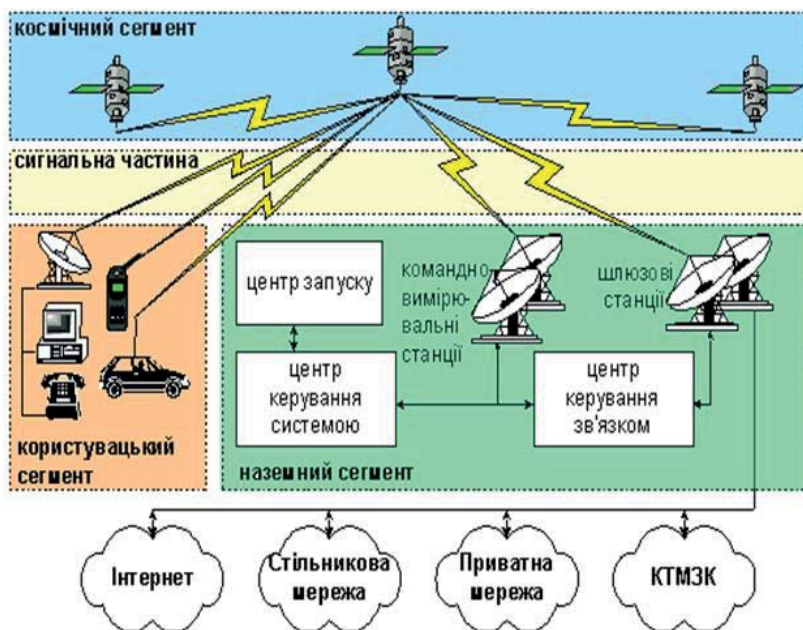


Рисунок 2.2 – Загальна структурна схема системи супутникового зв'язку

До системи супутникового зв'язку входить один або декілька супутників–ретрансляторів, які утворюють космічний сегмент системи.

Бортовий ретранслятор приймає сигнали земних станцій, підсилює їх і передає на землю. За допомогою бортових антен переданий супутником сигнал фокусується в один чи кілька променів, чим забезпечується формування необхідної зони обслуговування.

Космічна платформа призначена для підтримки роботи супутника зв'язку. Основними функціями космічної платформи є забезпечення бортового ретранслятора електроживленням і утримання супутника на заданій орбіті. До складу космічної платформи можуть входити: центральний процесор; радіоелектронне обладнання; антенні системи; система орієнтації і стабілізації; двигуни; система електроживлення (акумулятори та сонячні батареї).

Стійкість супутника і потрібна орієнтація антен підтримуються системою орієнтації і стабілізації. Її задача – слідкувати за орієнтацією супутника в просторі і параметрами орбіти. У разі потреби корекції положення, на супутник (з наземної керуючої станції) передаються відповідні команди, після одержання яких включається устаткування і здійснюється корекція. Залишений напризволяще супутник через деякий час перейде до випадкових обертань, перетворившись в непридатний для забезпечення зв'язку пристрій [10].

Розмір і вага супутника обмежені, в основному, можливостями транспортних засобів (ракет–носіїв), вимогами до сонячних батарей і обсягами палива для життєзабезпечення (зазвичай, протягом десяти років).

Основними характеристиками супутників зв'язку є кількість радіочастотних каналів (ретрансляторів) чи стовбурів, потужність передавачів у

кожному стовбурі, кількість і розміри зон обслуговування. Для зменшення взаємних перешкод передача сигналу із супутника (Downlink) ведеться на частоті, нижчій від частоти передачі сигналу з землі на супутник (Uplink). Тому ретранслятори супутника мають у своєму складі перетворювачі частоти.

Наземний сегмент супутникової системи зв'язку може містити:

- центр запуску – визначає програму запуску, збірку ракети-носія, передстартові перевірки та випробовування. Після запуску супутника керування ним здійснюється центром керування системою [9].

- центр керування системою – здійснює керування космічним угрупованням:

- контроль запуску і точності виведення на задану орбіту;
- контроль стану супутників;
- контроль і керування орбітами супутників;
- виведення супутників зі складу орбітального угруповання, та ін.

Вказані функції здійснюються на основі інформації від супутників. Службова інформація може передаватися також через територіально рознесені командно-вимірювальні станції.

- центр керування зв'язком – планує використання ресурсів супутників. Здійснює аналіз і контроль зв'язку через національні шлюзові станції.

- шлюзові станції (наземні станції) – до складу системи може входити декілька шлюзових станцій, які можуть встановлюватися незалежно у різних регіонах чи країнах.

Наземні станції можуть розрізнятися за видами послуг, що надаються, за складом устаткування, а також за належністю до того чи іншого стандарту.

*Основні функції шлюзової станції:*

- організація доступу до супутника із наземних мереж;
- мультиплексування;
- модуляція;
- обробка сигналу;
- перетворення частот.

До складу будь-якої наземної станції входить радіочастотне і каналоутворююче устаткування. До радіочастотного устаткування відносяться: антени СВЧ –діапазону – для прийому та ретрансляції сигналів та транспондери – прийомопередавачі. Як правило, ці компоненти поставляються в комплекті. Радіочастотне устаткування повинне відповідати типу обраного супутника і забезпечувати роботу каналоутворюючого устаткування.

Каналоутворююче устаткування визначає принципи роботи наземної станції і всієї мережі і працює за певними стандартами (SCPC, DAMA, TDMA, TDM/TDMA). До каналоутворюючого устаткування відносяться пакетні модеми (48 Мбіт/с).

Серед інших компонентів технічного забезпечення наземної шлюзової станції слід вказати: ПК – для керування великими потоками інформації (з базою даних персональних терміналів); комутаційне обладнання – для з'єднання з різними наземними системами зв'язку.

На сьогоднішній день надзвичайно популярними є наземні станції на основі VSAT-терміналів, які відрізняються невеликими розмірами, легкістю установки та невеликою ціною.

## 2.2 Наземні станції супутникових систем зв'язку

Наземні станції (ЗС) прийнято розділяти в залежності від функцій, які вони виконують:

- приймально-передавальні, що працюють у мережі магістрального телефонного зв'язку та обміну іншими видами повідомлень;
  - приймальні станції розподільних систем (ТБ, звукового мовлення, циркулярної інформації);
  - передавальні ЗС та прийомні установки систем супутникового телемовлення (СТБ);
  - абонентські термінали рухомих служб.
- Проміжне положення між першими двома категоріями займають малі ЗС. Основними показниками для всіх наземних станцій є:
- діапазон частот на передачу і прийом;
  - добротність станції (відношення коефіцієнта посилення до сумарної шумової температури ВЧ-тракту);
  - еквівалентна ізотропно випромінювана потужність.

Типова ЗС Intelsat стандарту В працює в діапазоні 6/4ГГц і містить дводзеркальну антену Кассегрена з діаметром основного дзеркала 9–14 м. Середньоквадратичне відхилення профілю дзеркала від розрахункового не перевищує 1 мм. Рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості задовольняє типовим нормам. Автоматичний супровід ШСЗ здійснюється методом екстремального регулювання, точність наведення складає 0,06 град. В якості МШП, в залежності від діаметра використовуються неохолоджувані параметричні підсилювачі або транзисторні. Для роботи в системі добротність станції повинна бути більш 31,7 дБ / К.

Станція забезпечує роботу в режимах МДЧР / ЧМ з числом каналів в стовбурі до 252, МДЧР / ОКН з ІКМ-ФМ з розносом несучих 45 кГц, БДЧР зі швидкістю 120 Мбіт / с, передачу даних зі швидкостями від 64 Кбіт / с до 44 Мбіт / с, обмін ТВ-програмами в смузі стовбура 36 МГц.

Для роботи в діапазоні 30/20ГГц в Японії використовуються ЗС з антеною діаметром 5 м, що рівносильно 25 м в діапазоні 6 / 4ГГц. Для компенсації загасання в опадах застосовується управління потужністю на передачі. Швидкість передачі становить 1,544 Мбіт / с на несучу, що забезпечує одночасну передачу мовних повідомлень, даних, факсиміле, нерухомих зображень.

У рамках Міжнародного консультативного комітету по радіозв'язку (МККР) проведені роботи по уніфікації вимог до ЗС, що дозволило отримати раціональні схемні рішення. В даний час багатьма компаніями випускаються спеціалізовані інтегральні мікросхеми окремих вузлів прийомних і передавальних пристроїв, що знизило вартість ЗС.

### 2.2.1 Малі ЗС

Ще однією формою використання супутникового зв'язку є системи, орієнтовані на користувача. З ростом енергетичних можливостей ШСЗ, формуванням багатопробіжних діаграм спрямованості бортових антен, стає можливим застосування при швидкостях передачі до 2–8 Мбіт/с простих і недорогих малих ЗС, що розміщуються безпосередньо на будівлі користувача, що підвищує оперативність, гнучкість і надійність зв'язку, виключає необхідність наземної з'єднувальної лінії і, в кінцевому рахунку, підвищує економічну ефективність використання супутникових каналів. Малі ЗС можуть використовуватися для зв'язку периферійних персональних комп'ютерів з центральним, дирекції підприємства з філіями, для періодичної передачі збирається інформація і у всіх інших випадках, коли потрібно забезпечити зв'язок з великим числом станцій, трафік яких невеликий [11].

Перші мережі малих ЗС створювалися в діапазоні 6/4 ГГц, однак, для придушення перешкод від сусідніх ШСЗ доводилося застосовувати або антени досить великого діаметру (3 ... 4,5 м), або неефективні методи багатостанційного доступу. Швидкість передачі не перевищувала 9,6 Кбіт/с. У цьому діапазоні працюють міжнародні системи ділового зв'язку і передачі даних IBS, VISTA, Internet. З переходом в діапазон 14/11 ГГц стало можливим обмінюватися інформацією зі швидкістю до 64 Кбіт / с з малою станцією, що має антену діаметром 1,2 ... 1,8 м.

У залежності від призначення та енергетики ШСЗ мережа малих ЗС може мати радіальну (з одним або двома стрибками), змішану або вузлову структури. У мережі з одним стрибком периферійні станції зв'язуються з центральною, а та, у свою чергу, з'єднується по наземним лініям зв'язку з телефонною мережею або мережею передачі даних. У мережах з двома стрибками периферійні ЗС можуть зв'язуватися між собою через центральну ЗС, що виконує функції комутатора, при цьому через велику затримку сигналів передача мовних повідомлень утруднена. У змішаній мережі можливі два варіанти організації зв'язку. Найбільшою ефективністю володіє вузлова структура мережі, коли кожна станція може зв'язуватися з кожною безпосередньо, на одному стрибку, а центральна станція виконує функції контролю і надання каналів. В останньому варіанті потрібна наявність ШСЗ з підвищеною енергетикою, наприклад, за рахунок формування вузьких спрямованих променів, і обробкою сигналів на борту [12].

### Анени ЗС

Антенна ЗС повинна мати високий коефіцієнт використання поверхні, відрізнятися низькою температурою і рівнем бічних пелюсток діаграми спрямованості, що не перевищує міжнародних норм, давати можливість наведення променя на ШСЗ. У системах з поділом за поляризацією антенна повинна забезпечувати кросполяризаційну розв'язку більше 27 дБ. Найкраще цим вимогам задовольняє дводзеркальна антенна система Кассегрена, найбільш

часто застосовувана на ЗС. У простих прийомних установках ТВ–мовлення частіше використовується однодзеркальна схема. Для зниження рівня бічних пелюсток антену виконують з винесеним опромінювачем, незатінюючим основне дзеркало. Для зниження шумової температури фідерного тракту прагнуть зменшити втрати в ньому шляхом застосування хвилеводу або виносу малошумного підсилювача (МШП) до опромінюючої системи.

### **2.2.2 Бортові ретранслятори ССЗ**

Радіотехнічне обладнання космічної станції–ретранслятори і антени є важливою складовою частиною ССЗ, від якої значною мірою залежать пропускна здатність, надійність зв'язку, спотворення сигналів та інші показники.

Основні показники космічної станції ті ж, що і ЗС:

- діапазони частот на приймання та передачу;
- добротність приймальної частини;
- число стовбурів;
- поляризаційні характеристики.

З урахуванням характеру перетворень сигналу розрізняють:

– ретранслятори гетеродинного типу, де підсилення сигналу в основному відбувається на ПЧ;

- ретранслятори прямого підсилення (на частоті прийому або передачі);
- ретранслятори з обробкою сигналу на борту в груповому спектрі.

Приймальна частина бортового ретранслятора зазвичай починається з МШП, в якості якого можуть використовуватися транзисторні або параметричні підсилювачі, або безпосередньо зі змішувача. Основними вимогами є мала маса, габарити і висока надійність вихідного пристрою. Типова вихідна потужність складає 5–15 Вт для малопотужних ШСЗ, 30–60 Вт для ШСЗ середньої потужності і 100 – 250 Вт для потужних радіомовних ШСЗ.

Умови виведення на орбіту та роботи у відкритому космосі пред'являють до апаратури космічних станцій ряд специфічних вимог:

- мінімальна маса при заданих вимогах надійності та електричних показниках;
- обмежені габарити антенної системи, що визначаються діаметром обтічника ракети–носія (2,5–3,5 м для найбільших сучасних ракет);
- здатність витримувати прискорення і вібрації, що виникають при роботі двигунів, різкі перепади температур, вплив невагомості, радіаційного опромінення та інших факторів космічного польоту;
- висока надійність в необслуговуваному режимі, тривалий термін служби, що досягає 7–10 років.

### **Антени**

Враховуючи перераховані вимоги, для виготовлення бортових антен використовують легкі метали: магній, титан, алюміній, а також композитні матеріали на основі графіту, що володіють великою жорсткістю і малим коефіцієнтом лінійного розширення [13]. Слабко спрямованими антенами, що

формують глобальні і напівглобальні зони обслуговування, зазвичай служать рупорні, штирьові або спіральні антени, при необхідності формування спеціальної форми або вузьких променів застосовуються дзеркальні антени зі складними опромінювачами.

### **Ретранслятори**

Бортові ретранслятори ШСЗ також мають ряд істотних відмінностей від аналогічної по виконуваних функцій апаратури, що знаходиться в наземних умовах. У першу чергу це відноситься до конструктивних особливостей, технології виготовлення, методів досягнення високої надійності. У ретрансляторах, що забезпечують обробку пакетів, найбільш складним пристроєм є процесор, що здійснює обробку високошвидкісних сигналів. Прийняті пакети БДЧР надходять в демодулятори, які вибираються відповідно з частотами несучих і швидкостями передачі окремих пакетів. Інформаційний зміст пакету записується у вхідну пам'ять. У межах кадру БДЧР після прийому ця інформація піддається декодуванню (якщо на передачі застосовувалося завадостійке кодування), перетворенню за форматом і через комутатор групового спектру направляється в пристрій пам'яті відповідної лінії зв'язку вниз. У межах другого кадру після прийому пакети, що направляються по лінії вниз, формуються шляхом виведення інформаційного змісту вихідної пам'яті на вхід модулятора через декодер з виправленням помилок на вході (якщо кодування необхідне). Завдяки роботі в режимі перемикання променів кожен пакет передається в напрямку тієї ЗС, для якої він призначений. Для елементів комутації та обробки пакетів висуваються вимоги високої швидкодії.

### **2.3 Частоти супутникового зв'язку**

Ширина смуги (bandwidth) супутникового каналу характеризує кількість інформації, яку він може передати в одиницю часу. Типовий супутниковий прийомопередавач має ширину смуги 36 МГц на частотах від 4 МГц до 6 МГц. Таких прийомопередавачів на супутнику встановлюється від 12–24, що дає в результаті від 432 до 864 МГц.

Смуги частот супутника зв'язку вказуються у парах.

Для зменшення взаємних перешкод передача сигналу із супутника (Downlink) ведеться на більш низькій частоті, ніж частота передачі сигналу з землі на супутник (Uplink). Тому ретранслятори супутника мають у своєму складі перетворювачі частоти.

*Межі частотного діапазону визначаються значною кількістю чинників, з яких найбільш важливими є допустимі розміри антен, особливості поширення радіохвиль і існуючою практикою розподілу частотного ресурсу між різними службами.*

Сучасні супутникові системи найчастіше застосовують одну з двох смуг: С–смугу (від супутника до наземної станції в області 6ГГц і назад в області 4ГГц), або Ku–смугу (14ГГц і 12ГГц, відповідно) (рис.2.3). Ширина будь-якої смуги складає 500 МГц.

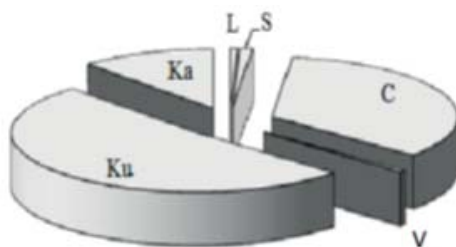


Рисунок 2.3 – Розподіл частотного ресурсу ССЗ за діапазонами

LEO–супутники використовують інші смуги, що одержали позначення L і Ka. L–смуга (15 МГц у діапазоні від 1.5 до 1.6ГГц) використовується для обслуговування трафіку між супутником і мобільним пристроєм. Ka–смуга (2.5ГГц у діапазоні від 30 до 120ГГц) використовується для зв'язку між супутниками, а також між супутником і наземними станціями.

У таблиці 2.1 наведено використання різних радіочастотних діапазонів у різноманітних супутникових системах зв'язку.

Таблиця 2.1 – Радіочастотні діапазони

| Позначення смуги | Діапазон частот (ГГц) | Приклади систем                           | Типове використання                                                                                  |
|------------------|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P                | 0.23 – 1.00           | Orbcomm, E–SAT                            | Пейджинг, визначення місцезнаходження                                                                |
| L                | 1.53 – 2.70           | Iridium, Globalstar, ICO, Thuraya         | Телефонія, мобільний зв'язок, пейджинг, низькошвидкісна передача даних                               |
| S                | 2.70 – 3.50           | Globalstar                                | –/–                                                                                                  |
| C                | 3.70 – 6.50           | Intelsat, Skynet                          | Фіксований зв'язок, передача відео, VSAT–застосування                                                |
| X                | 7.25 – 8.50           | –                                         | –                                                                                                    |
| Ku (Європа)      | 11.0 – 14.0           | Direct V, Echostar, Astra                 | Фіксований зв'язок, ТБ, передача даних, мобільний зв'язок, ширококутовий зв'язок, доступ до Інтернет |
| Ku (США)         | 11.0 – 17.8           | Spaceway, Cyberstar, Astrolink, Teledesic |                                                                                                      |
| Ka               | 17.7 – 30.5           | Teledesic, Skybridge, Cyberstar           | Ширококутовий зв'язок, високошвидкісна передача даних, доступ до Інтернет                            |
| V                | 31.0 – 70.0           | Milstar, AFSATCOM, USTS                   | Військові застосування                                                                               |

Атмосфера Землі прозора для електромагнітного випромінювання в С–смугі, однак багато наземних мікрохвильових пристроїв генерують сигнал на цих частотах, тому в умовах міста відносно слабкий супутниковий сигнал глушиться. Наземні станції для С–смуги вимагають дорогих і громіздких антен і повинні розміщуватися подалі від міських центрів.

Радіохвилі Ku-смуги можна надсилати, використовуючи сильний і вузькоспрямований промінь. Це дозволяє використовувати антени невеликого діаметру і різко знижує їхню вартість. Наземні мікрохвильові сигнали ніяким чином не впливають на сигнали Ku-смуги частот, і наземні станції Ku-смуги частот можуть бути розміщені в центрах міст. Однак у даному діапазоні частот радіохвилі чутливі до атмосферних явищ.

## **2.4 Протоколи супутникових мереж**

Для супутникових систем застосовуються протоколи сімейства Aloha, розроблені на початку 70-х років XX ст. у Гавайському університеті.

Перші версії цих протоколів були асинхронними. Наземна станція може почати передачу даних в будь-який момент часу, після чого прослуховує ефір, очікуючи, коли супутник ретранслює передачу. Якщо ретрансляція не відбувається, передача повторюється. Таким чином, ці протоколи працювали на основі множинного доступу з виявленням колізій, аналогічно Ethernet, проте час обробки колізій на відстанях в десятки тисяч кілометрів набагато більший, ніж в локальних мережах [14].

При роботі за синхронними протоколами всі наземні станції, які працюють з певним супутником, жорстко синхронізуються з ним. Час квантується на інтервали фіксованої довжини і початок передачі кожної станції повинен співпадати з початком такого інтервалу. Це, в середньому, в два рази зменшує кількість конфліктів порівняно з асинхронною версією протоколу.

Подальші удосконалення протоколу Aloha полягають в наданні за вимогою конкретній наземній станції виділеного часового проміжку, а також присвоєнні наземним станціям пріоритетів.

Для кодування сигналу при передачі використовується два методи – FDM – мультиплексування з розділенням частот, і TDM – мультиплексування з часовим розділенням.

FDM орієнтований на передачу аналогових мовних сигналів. За цим методом кожному потоку виділяється смуга шириною в 4 кГц в загальній смузі пропускання. Для передачі цифрових даних їх спочатку перетворюють в аналоговий сигнал, а потім декілька одночасних сигнальних потоки мультиплексуються в одну смугу пропускання.

В TDM час квантується, сигнал з одного потоку “розмазується” на всю смугу пропускання і передається на протязі виділеного інтервалу. Потім обробляється другий потік і т.д. Такий підхід дозволяє використовувати смугу більш гнучко, але вимагає більш складного обладнання.

## **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. З яких сегментів складається ССЗ?
2. До якого сегменту належить центр запуску?
3. Яким є найбільший діапазон частот?

4. Які сегменти розрізняють в структурі ССЗ?
5. Протоколи супутникових мереж.
6. В якому діапазоні здійснюється широкосмуговий зв'язок?
7. Яка смуга частот використовується для здійснення мобільного супутникового зв'язку?
8. В якому діапазоні частот можлива високошвидкісна передача даних?

### 3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТА ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ

#### 3.1 Багатостанційний доступ

*Багатостанційний доступ* (БД) у супутниковому зв'язку – це можливість одночасної передачі сигналів множини земних станцій через один загальний для усіх стовбур супутникового ретранслятора (рис. 3.1).

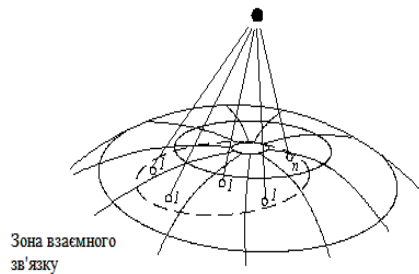


Рисунок 3.1 – Організація багатостанційного доступу

Розподіл ресурсів штучних супутників Землі (потужності і смуги) за вимогами різних наземних станцій (для ліній ЗС – ШСЗ) здійснюється на трьох етапах:

- формування на ШСЗ кількох стволів за рахунок використання кількох ретрансляторів, що працюють в різних частотних діапазонах;
- розподіл каналів для забезпечення багатостанційного доступу в стовбурі;
- динамічний розподіл каналів або груп каналів для їх колективного використання на основі методів розподілу запитів.

На штучному супутнику Землі, як правило, встановлюється кілька незалежних ретрансляторів [15]. Кожен ретранслятор має вхідний фільтр, який обмежує прийом сигналів бажаною смугою частот. Розподіл ресурсів кожного ретранслятора, тобто формування його незалежних каналів, можна здійснити шляхом використання ортогональних структур сигналів, а для забезпечення багатостанційного доступу використовуються: частотне ущільнення (БДЧТУ), часове ущільнення (БДЧУ) і кодове ущільнення (БДКУ).

**Доступ з частотним розподілом каналів (БДЧТР)** є найбільш простим і поширеним методом, що використовується як в аналогових, так і цифрових ССЗ (рис.3.2).

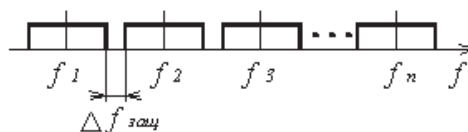


Рисунок 3.2 – Багатостанційний доступ з частотним розподілом каналів

Для кожної станції виділяється певна несуча частота ( $f_1, f_2, \dots, f_n$ ). Рознесення між парою сусідніх несучих обирається таким, щоб була виключена можливість взаємного перекриття спектрів при модуляції.

### Доступ з часовим розподілом (БДЧР)

У даному випадку робота земних станцій через ретранслятор здійснюється по чергово. Тому всі станції можуть працювати на одній частоті і повинні мати спільну систему синхронізації, що забезпечує строго по чергові включення і виключення передавачів.

При цьому кожній ЗС для випромінювання сигналів виділяється певний, періодично повторюваний часовий інтервал. Інтервали випромінювання всіх станцій взаємно синхронізовані, в силу чого відбувається їх перекриття. У кожний момент часу через ретранслятор проходить сигнал тільки однієї станції і відсутня нелінійна взаємодія сигналів різних ЗС у підсилювачі ретранслятора.

Розглянемо синхронну роботу трьох станцій – 1, 2 і 3 (рис.3.3).

Протягом інтервалів часу  $\tau$ , які називаються кадрами станцій, кожна станція випромінює коливання несучої частоти, модульовані повідомленням, що надходить від апаратури поділу; через  $\tau_3$  позначений захисний інтервал часу, що запобігає одночасному включенню двох наземних станцій, а через  $T_{\text{ц}}$  – цикл передачі.

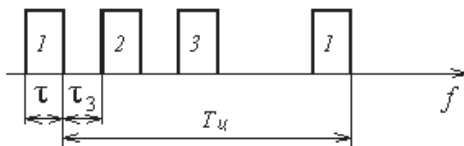


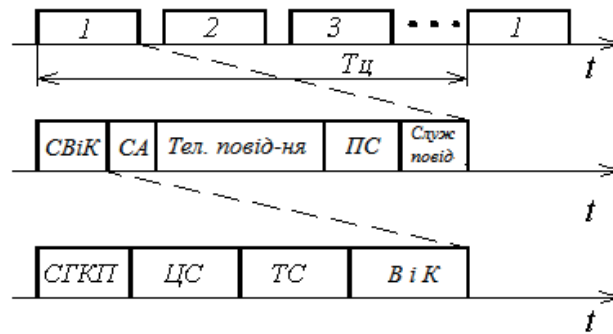
Рисунок 3.3 – Багатостанційний доступ з часовим розподілом каналів

При часовому розділенні каналів використовується кадрова структура, що, на відміну від методів безперервної передачі, має на увазі необхідність загальномережевої синхронізації усіх наземних станцій і використання пакетів з цифровими сигналами.

Час, що надається ЗС для синхронної передачі, залежить від загальної синхронізації, що встановлюється або безпосередньо ведучою станцією, або непрямым шляхом, з урахуванням затримки поширення сигналу на трасі ЗС – ШСЗ, яка зазвичай вимірюється наземною станцією, що приймає свою власну передачу.

Зазвичай системи з БДЧР працюють з геостаціонарними ШСЗ, оскільки здійснити синхронізацію при використанні рухомих супутників складно, так як, у даному випадку, відстані між ШСЗ і земними станціями будуть постійно змінюватися.

На рисунку 3.4 наведено приклад детального циклу роботи системи БДЧР. Протягом кожного кадру зі станцій передаються не тільки повідомлення, що йдуть по телефонним і службовим каналам зв'язку, а й кілька спеціальних сигналів.



СВіК – сигнали синхронізації, виклику і комутації,  
 СА – сигнали адрес;  
 ПС – пілот-сигнал.

Рисунок 3.4 – Приклад роботи системи БДЧР

До складу СВіК входять: сигнал синхронізації опорних генераторів при когерентному прийомі (СГКП), сигнал циклової синхронізації (ЦС), сигналу, необхідного в системах з ІКМ для тактової синхронізації (ТС), і сигналів, що забезпечують виклик абонентів і комутацію ланцюгів (ВіК).

Інформаційна частина кадру становить близько 90% від повної довжини кадру.

Системи з БДЧР в порівнянні з БДЧТР мають ряд переваг:

1) імпульсна потужність передавального пристрою даної станції не залежить від умов роботи інших станцій і не вимагає регулювань, так як взаємне пригнічення сигналів відсутнє;

2) усі земні передавальні станції можуть працювати на одній частоті, а приймальні – на іншій, що спрощує побудову станцій;

3) передавач ретранслятора працює в режимі максимальної потужності; при цьому відсутні взаємні перешкоди між ретрансльованими сигналами.

До недоліків систем з БДЧР можна віднести складність системи синхронізації станцій і виникнення перешкод при порушенні синхронізації роботи хоча б однієї станції.

Метод БДЧР отримав застосування для передачі даних великого числа абонентських станцій, підключених до мережі цифрового телефонного зв'язку і за допомогою апаратури ущільнення каналів організації передачі через головні наземні станції.

#### **Доступ з кодовим поділом (БДКР).**

Метод кодового розподілу заснований на одночасній передачі в смузі частот ретранслятора сигналів кількох станцій, модульованих інформаційним сигналом і кодовим сигналом – довгою псевдощумовою послідовністю. На прийомі інформація виділяється шляхом множення прийнятого сигналу на копію псевдощумової послідовності. Надійний поділ досягається завдяки ортогональності кодових сигналів окремих ЗС.

До переваг використання таких сигналів у супутниковому зв'язку

належать:

- незначні перешкоди іншим системам і слабка чутливість до перешкод від інших систем;
- низька ймовірність перехоплення;
- несприйнятливості до засвічення Сонцем (при малих антенах).

Основним недоліком БДКР є низька ефективність використання пропускну здатності ретранслятора (1–2%).

БДКР з широкосмуговими сигналами використовується в мережах з великим числом рідко працюючих терміналів при значному рівні перешкод, коли економічна ефективність визначається не ступенем завантаження ретранслятора, а різким зниженням витрат на земну мережу.

### **3.2 Особливості використання супутникових каналів**

Мережа зв'язку, як правило, будується за ієрархічним принципом з кількома рівнями комутації. Для передачі різних видів інформації вводиться типова номенклатура каналів і трактів. За основу прийняті канал тональної частоти зі смугою 300 ... 3400 Гц і еквівалентний йому цифровий канал зі швидкістю 64 Кбіт/с. У мережі утворюються також канали передачі звукового мовлення, ТБ та інші широкосмугові канали.

При використанні в мережі супутникових ділянок необхідно враховувати їх особливості, пов'язану з фізичною природою супутникового каналу – час поширення сигналу між двома ЗС через супутник, розміщений на геостаціонарній орбіті, досягає 260 мс. При появі в телефонному каналі двох і більше супутникових ділянок якість зв'язку погіршується через вплив ехо–сигналу, тривалу відповідь (до більш, ніж 1,2 с) і можливе порушення системи автоматичного встановлення з'єднання. Для запобігання появи подвійних стрибків вводять певні обмеження на використання супутникових каналів.

Супутниковий зв'язок використовується у двох основних сферах: передача циркулярної інформації великій кількості абонентів або ширококомовна передача (ТВ– та звукове мовлення, передача газет) і організація магістральних ліній зв'язку великої протяжності. Усе більше поширення знаходять нові послуги, під якими розуміють передачу по супутниковим каналам різної інформації для всіх споживачів або певних їх груп: конференц–зв'язок за участю двох або більшої кількості абонентів, телефорум, ТВ–системи з повільною розгорткою, ТБВЧ, телетекст, передача відеотеатру, навчальні, професійні послуги із забезпечення місцевих бібліотек, пакетна передача цифрової інформації, передача масивів даних для обчислювальної техніки, факсиміле, телетекст, електронна пошта, фінансова інформація, оголошення тощо. Зростання загальної пропускну здібності, розширення послуг, введення в експлуатацію нових видів і типів каналів зв'язку є характерним для супутникових систем зв'язку, що розвиваються.

### 3.3 Передавання сигналів різної форми

У системах супутникового зв'язку можливе передавання сигналів трьох видів: аналогових, цифрових, циркулярних.

Передавання сигналів у *аналоговій формі* (ТБ, багатоканальна телефонія) зазвичай здійснюється із застосуванням частотної модуляції (ЧМ), що вимагає порівняно невеликої потужності передавача.

Перевагою аналогової передачі є більш просте устаткування, особливо при передачі ТВ–сигналів (1 частотний канал шириною 8 МГц в змозі передати 1 аналоговий ТВ–канал, а цифровий, у тому ж каналі – 4 ТВ канали).

Ефективним засобом підвищення пропускної спроможності системи телефонного зв'язку є статистичне ущільнення, засноване на використанні природних пауз у розмові двох абонентів

Останнім часом переважний розвиток отримало використання в системах супутникового зв'язку цифрових методів передачі, які володіють наступними перевагами:

- більш високою пропускною здатністю ССЗ шляхом використання оптимальних методів модуляції та кодування;
- можливістю більш повного використання статистичних характеристик переданого повідомлення для підвищення пропускної спроможності системи;
- більш ефективною передачею дискретних сигналів.

*Циркулярний зв'язок* – багатоадресний, при якому повідомлення з одного пункту передається одночасно на кілька інших пунктів (сигнали ТБ та звукового мовлення, сигнали зображення газетних смуг, передача даних, конференц–зв'язок).

Широке застосування знайшов спосіб одночасної передачі в супутниковому стовбурі великого числа (до 25) високоякісних звукових програм, переданих у цифровій формі з часовим розподілом.

### 3.4 Методи комутації і передачі даних в ССЗ

Розрізняють дві групи методів:

- методи комутації каналів, призначені для обробки телефонних повідомлень;
- методи комутації пакетів призначені для обробки даних.

#### **Системи з комутацією каналів**

Пропускна здатність ретранслятора розподіляється між каналами шляхом організації багатостанційного доступу з частотним ущільненням. Усі канали системи, крім одного службового, перерозподіляються за запитами станцій. Службовий канал використовується за способом багатостанційного доступу з часовим ущільненням. Таким чином, кожній станції в кадрі службового каналу постійно виділяється один часовий сегмент. Коли на інтерфейс земної станції по лінії наземного зв'язку надходить новий запит на з'єднання (виклик), ця станція надсилає у власному сегменті службового каналу вимогу на виділення двостороннього каналу, тобто пари каналів з сукупності тих, що

перерозподіляються.

За наявності хоча б одного вільного каналу між станцією, яка викликає і тією, яку викликають, встановлюється повний дуплексний зв'язок. Після закінчення з'єднання будь-яка з пари станцій звільняє канал шляхом надсилання сигналів у власному сегменті службового каналу.

При БДЧТУ формування каналів досягається шляхом розподілу повної смуги ретранслятора між різними групами несучих і обмеження частотної смуги передачі на кожній несучій виділеним піддіапазоном. Ретранслятор працює в режимі, близькому до лінійного, тому потужність, виділена для кожної несучої приблизно пропорційна її потужності на лінії ЗС – ШСЗ.

Багатостанційний доступ з частотним ущільненням не потребує координації запитів у реальному часі і може використовуватися для передачі як аналогових, так і цифрових сигналів. Економічно доцільно використовувати БДЧТУ для групоутворення на лініях дальнього телефонного зв'язку, які обслуговують запити, що надходять з великою скважністю, але вимагають високих швидкостей передачі даних, що потрібно при ущільненні трафіку великого числа користувачів однієї ЗС, а також у тих випадках, коли повний трафік, що надходить від ЗС, невеликий і має невелику інтенсивність.

У системі з часовим ущільненням кожному каналу в межах кадру, тривалістю 125 мкс при швидкості передачі даних 64 кбіт/с виділяється часовий сегмент, що вміщує 8 біт цифрового сигналу мови, отриманого шляхом ІКМ. У кожному кадрі канали розподілені на групи, причому кожній абонентській станції виділена своя група. Кількість каналів у кожній групі періодично перерозподіляється, так що ЗС з великим навантаженням можуть використовувати велику кількість каналів.

Обидві системи ефективні при телефонному зв'язку, для обслуговування якого вони і були призначені, оскільки тривалість телефонної розмови, як правило, значно перевищує час, необхідний для виділення нового каналу.

Використання методу кодового ущільнення дозволяє радіостанціям працювати одночасно і в одній і тій же смузі частот. Передані сигнали всіх абонентів розрізняються за формою, що й дозволяє розділити їх у приймачах. Кожен приймач із безлічі прийнятих сигналів виділяє «свої» сигнали, форма яких відома в приймачі й відрізняється від форми сигналів усіх інших абонентів.

### **Комутація пакетів**

Використання цього методу забезпечує значне підвищення ефективності системи, у порівнянні з системами комутації каналів, але має більш складну систему управління.

Для потреб пакетного зв'язку потрібні розробки нових методів розподілу пропускної здатності штучного супутника Землі з комутацією пакетів і множинним або багатостанційним доступом абонентських станцій до супутникової системи.

Першими розробками в області систем зв'язку з множинним доступом і пакетною комутацією стали: випадковий метод, неявного резервування і явного резервування.

### 3.5 Особливості супутникових систем зв'язку

1. Складність запуску ШСЗ. Бере участь у роботі великий комплекс обладнання.
2. Відсутність завмирань при зв'язку через ШСЗ. Спостерігається тільки коливання рівня сигналу під час опадів.
3. Рівень сигналу на вході земної станції дуже слабкий. Потрібні чутливі приймачі.
4. Система зв'язку через ШСЗ охоплює велику територію на поверхні Землі. Трьома супутниками можна охопити 90% поверхні Землі.
5. Бортова апаратура оснащена тільки однією антеною. Вона обслуговує одночасно обидві станції А і Б.
6. Надійність бортової апаратури повинна бути високою (проводиться ретельний підбір усіх елементів).
7. Має місце затримка сигналу через великі відстані ( $\approx 0,3$  с в один бік при геостаціонарній орбіті). Це запізнювання приводить до відлуння сигналів.
8. Виникає ефект Доплера. Полягає він у тім, що через рух приймача й передавача, частота прийнятого сигналу змінюється. Для боротьби із цим явищем застосовується АПЧ.
9. Багатостанційний доступ, що означає можливість організації зв'язку всіх земних станцій через один ШСЗ.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які є типи ущільнення для багатостанційного доступу?
2. Переваги аналогової передачі.
3. Етапи розподілу ресурсів ШСЗ за вимогами ЗС.
4. Які є переваги цифрового методу передачі?
5. Недоліки систем з БДЧР.
6. Що таке багатостанційний доступ?
7. Що входить до складу СВіК?
8. Переваги БДКР.

## 4 СИСТЕМИ ФІКСОВАНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Фіксовані супутникові служби призначені для організації зв'язку з нерухомими наземними станціями і зазвичай будуються на базі супутників–ретрансляторів, що запускаються на геостаціонарну орбіту.

Послуги фіксованого супутникового зв'язку надають п'ять великих міжнародних організацій: Intelsat, Intersputnik, Eutelsat, Arabsat і AsiaSat і близько 50 регіональних і національних компаній. Серед них безперечним лідером є міжнародна система Intelsat. Серйозну конкуренцію складають також міжнародні комерційні супутникові системи PanAmSat і Orion, що забезпечують безперервне покриття основних регіонів Земної кулі.

До систем фіксованого супутникового зв'язку відносяться:

- **Системи розподілу радіо– і телевізійних програм** (широкомовлення) – займають до 80% ресурсів геостаціонарних супутникових систем. Як приклади таких систем можна назвати російські супутники "Галс", "Бонум–1" і закордонні Intelsat, Astra, DirectTV, що працюють з антенами діаметром 45–90 см.

- **Системи телефонного зв'язку** (віддаленого доступу до телефонних мереж). Як приклад, можна навести систему Intelsat, через 25 супутників якої передається приблизно 2/3 міжнародного телефонного трафіку.

- **Супутникові магістральні системи**, для організації каналів між великими вузлами (опорні мережі). Приклади магістральних систем – російські супутники "Обрій" і "Експрес", що є малопотужними магістральними системами, для роботи з ними необхідні антени розміром 4,5–12 м. До систем середньої потужності можна також віднести супутники "Експрес–М", "Купон", "Ямал", що дозволяють використовувати для роботи з ними невеликі наземні станції з антенами діаметром 1,2–2,4 м.

- **Системи передачі даних**, корпоративні мережі передачі даних створюються переважно на основі геостаціонарних систем. Щоправда, відомий проект Teledesic передбачає використання низькоорбітального угруповання супутників в системі "Інтернет у небі". Основне призначення системи – надання послуг широкополосного доступу до Інтернет, а також побудова корпоративних мереж.

### 4.1 Системи широкомовлення та доступу в Інтернет

У регіонах з недостатньо розвинутою телекомунікаційною інфраструктурою реальною альтернативою наземним каналам є організація високошвидкісного доступу в Інтернет через супутник.

Існує два варіанти організації доступу в Інтернет за допомогою систем супутникового зв'язку:

- Симплексний (передача інформації через супутниковий канал лише в одному напрямку – до користувача).

- Дуплексний (передача інформації через супутниковий канал здійснюється в обох напрямках).

На сьогоднішній день найбільш розповсюдженим варіантом є симплексний канал або Інтернет мовлення (IP–broadcasting). Для організації таких каналів використовуються супутникові системи розподілу радіо– і телевізійних програм.

### DVB – технологія

Системи на базі DVB (digital video broadcast) технології одержали широке поширення з початком ери цифрового телебачення і появою самого протоколу DVB. Перша система на базі цієї технології для інтернету – DirecPC – з'явилася у 1998 році і мала успіх у США і Західній Європі. Серед інших подібних систем можна назвати: Speedcast, Heliosnet, НТВ–Інтернет, IP–Advantage.

Передача супутникового сигналу в цьому випадку ведеться тільки в один бік, до клієнта, а зворотний канал організований по "землі" (рис. 4.1 ). Пропускна здатність супутникового каналу – до 45 Мбіт/с, наземного каналу – 9,6...33.6 кбіт/с.

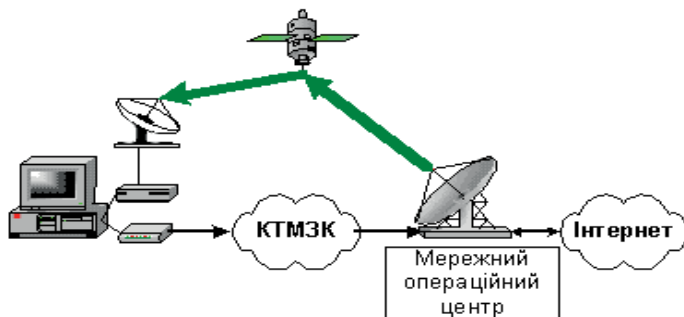


Рисунок 4.1 – Схема зв'язку в DVB–системах

Оскільки клієнтський трафік має високу асиметричність (1 від клієнта та 7–10 до клієнта), то така організація зв'язку є досить ефективною.

Основні клієнти такої послуги – SOHO (small office – home office, тобто маленькі компанії, та домашні користувачі)

Після інсталяції DVB–карти (супутникового модема) на комп'ютері клієнта встановиться програма "DVB Modem", після запуску якої з'являється вікно "ComBox SatStream" (рис.4.2), де виводяться результати послідовного виконання процесів ініціалізації устаткування абонента в системі.

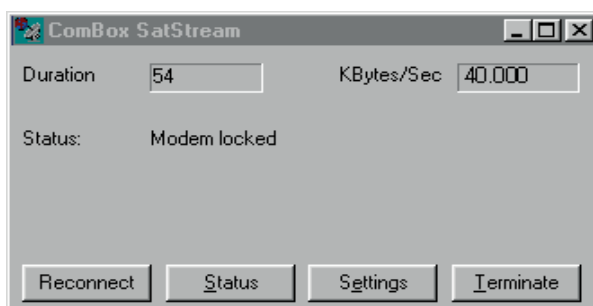


Рисунок 4.2 – Вікно "ComBox" SatStream

Після аутентифікації абонента по запитуваному каналу (телефонному), потоки відповідних даних направляються від джерела інформації не до абонента безпосередньо, а винятково на мережний операційний центр, і лише потім – по супутниковому каналу – доставляються абоненту

Для потенційного провайдера конфігурація стандартної станції супутникового зв'язку для організації Інтернет-мовлення за технологією DVB коштує 30–100 тис. доларів США. Крім приймально-передавальної станції необхідний комплект устаткування: супутниковий модулятор і DVB-мультіплексор, NMS (Network Management System – центр керування мережею) і проксі-сервер ( від 60 до 100 тисяч доларів).

Оскільки необхідно також платити за використовуваний супутниковий ресурс (не менше 300 тис. доларів на рік), а при невеликій абонентській базі використання цього ресурсу незначне і система не є окупною, такі проекти реалізуються шляхом інтеграції рішення по Інтернет доступу в мережу регіонального телерадіомовлення. У цьому випадку Інтернет-провайдер несе витрати тільки за займану ним під IP віщання смугу транспондера супутника-ретранслятора.

### Frame Relay

Особливістю використання протоколу Frame Relay (рис. 4.3) в супутникових мережах є те, що він має широкі можливості по розподілу фізичного каналу передачі на незалежні віртуальні канали, у кожному з яких передається свій потік інформації, на відміну від протоколу DVB, що не має гнучких засобів керування і резервування пропускної здатності. Якщо ж канал не завантажений, то вільною смугою можуть користуватися всі, досягаючи швидкостей у кілька разів більших, ніж обговорена мінімальна.

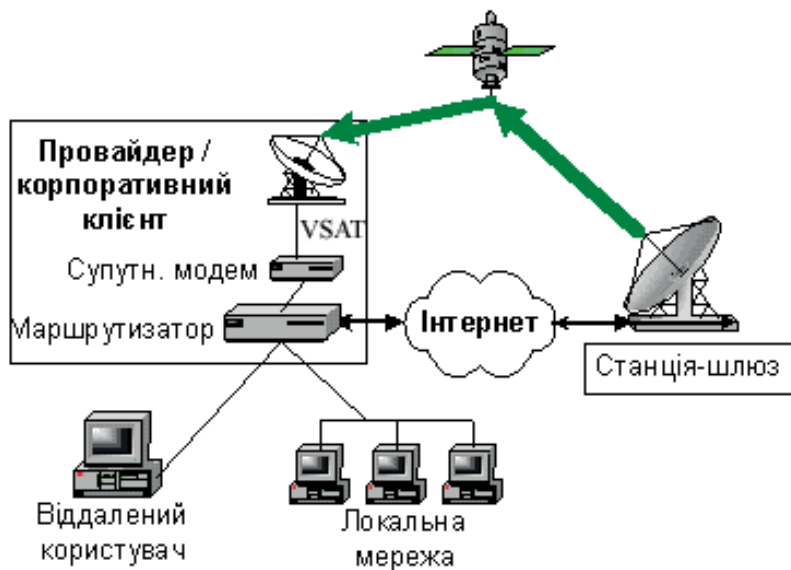


Рисунок 4.3 – Схема зв'язку в мережі Frame Relay

Крім цього, протокол Frame Relay може здійснювати транспорт не тільки IP, але й інших типів трафіку, наприклад, X.25, Ethernet Bridge, Voice over FR що розширює область застосування каналів broadcast на основі Frame Relay. Для реалізації такої функції в DVB – системі на прийомній стороні потрібно додатковий маршрутизатор і досить дорогий пристрій – демультимплексор DVB.

Швидкість у супутниковому каналі варіюється з 32 кбіт/с до 8 Мбіт/с.

Серед рішень на основі Frame Relay можна назвати IP Multicasting.

Дана технологія орієнтована на регіональних і корпоративних клієнтів. Безумовно, використання такої супутникової мережі не забезпечить дуже низьких цін на Інтернет для тих, хто підключений до прийомних абонентських станцій. Однак вона надасть високошвидкісний доступ до Інтернет у тих місцях, де іншої альтернативи просто немає.

## 4.2 Технології для VSAT–мереж

VSAT (Very Small Aperture Terminal) дослівно переводиться як "термінал з дуже малою апертурою" (антени). Це наземні станції супутникового зв'язку, технічні характеристики яких відповідають вимогам Рекомендацій МСЕ–Р S.725–S.729.

Серед основних вимог:

- станції VSAT відносяться до Фіксованої супутникової служби (ФСС) і повинні відповідати вимогам Регламенту Радіозв'язку;
- для роботи використовуються діапазони частот, виділені для ФСС (14 і 6ГГц на лінії "вгору" і 11–12 і 4ГГц на лінії "вниз");
- діаметр антен знаходиться в межах 0.9... 3.5 м;
- швидкість передачі інформації зі станції знаходиться в межах 1.2 кбіт/с – 2.048 Мбіт/с;
- станції встановлюються безпосередньо в користувача, причому щільність розміщення їх на обмеженій території може бути дуже високою;
- станції можуть працювати автономно, контроль і керування роботою станцій у мережі здійснюються централізовано;
- станції можуть застосовуватися для передачі даних і телефонії в цифровому вигляді і в режимах роботи тільки на прийом (симплекс) чи на прийом/передачу (дуплекс);
- у станціях використовується малопотужний радіопередавач (від декількох ватів до десятків ватів) з обов'язковим обмеженням випромінюваної потужності з метою безпеки користувачів.

Мережі VSAT будуються на базі геостационарних супутників–ретрансляторів. Це дозволяє максимально спростувати конструкцію абонентських терміналів і постачати їх простими фіксованими антенами без системи спостереження за супутником. Для забезпечення роботи через малогабаритні абонентські станції типу VSAT супутникові передавачі повинні мати вихідну потужність близько 40 Вт.

Оскільки станції VSAT відносяться до Фіксованої супутникової служби, на їх основі можна будувати супутникові мережі для надання послуг, передбачених

цією службою, тобто: – передача даних; – передача голосу; – передача зображень; – відеоконференції; – доступ в Інтернет; – мультимедіа.

По усьому світі число встановлених станцій вимірюється сотнями тисяч, а число абонентів, що обслуговуються – сотнями мільйонів. В Україні на сьогоднішній день вже більше 400 станцій по всій країні, об'єднані в корпоративні системи.

Слід відмітити також, що поряд із такими перевагами даної технології як відносна дешевизна та швидкість монтажу, для використання станції VSAT необхідний дозвіл відповідних органів. В Україні одноразові витрати на реєстрацію земних станцій найчастіше перевищують вартість устаткування наземних станцій. Вартість аналогічних процедур в інших країнах значно нижча.

### 4.3 Структура станції VSAT

Термінал VSAT складається з трьох основних елементів (рис. 4.4):

- антенна система;
- зовнішній блок (OutDoor Unit, ODU), що розміщується безпосередньо на антені;
- внутрішній блок (Indoor Unit, IDU), що встановлюється в приміщенні користувача.

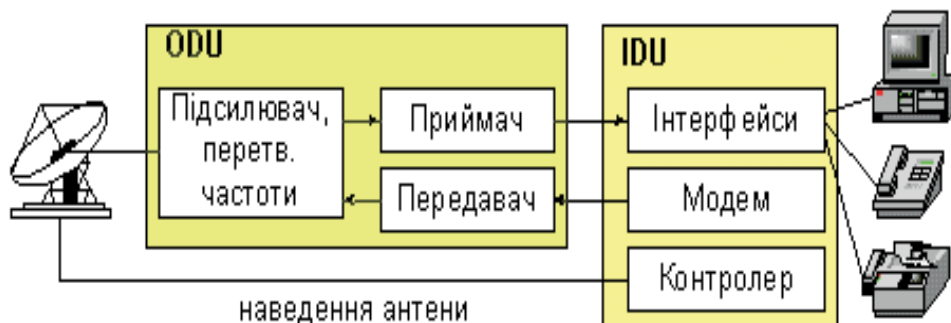


Рисунок 4.4 – Структура VSAT-терміналу

Діаметр антен визначається діапазоном частот, швидкістю передачі інформації, потужністю радіоканалу та умовами експлуатації.

Зовнішній блок зазвичай складається з підсилювача з перетворювачем частоти та приймача (і передавача).

Внутрішній блок включає супутниковий модем, контролер та інтерфейсні плати, які дозволяють підключати різноманітне обладнання обробки даних та забезпечувати зв'язок з телефонною мережею.

Серед лідерів світових постачальників VSAT компанії: Hughes, NEC, AT&T Tridon, GTE Spacenet, Scientific Atlanta. Існують також російські

виробники VSAT-терміналів, продукція яких не поступається західним зразкам (РКК "Енергія" та ін.).

#### 4.4 Типи терміналів VSAT

Існує кілька типів земних станцій VSAT. Їх можна умовно розділити на чотири покоління. Поява кожного нового покоління VSAT ставала можливою у міру появи нових технологій, створення більш потужних супутників зв'язку й освоєння нових діапазонів частот.

VSAT *першого покоління* працювали в С-діапазоні і використовувалися тільки в мережах мовного типу, тобто абонентські термінали могли лише приймати потоки даних і режим передачі в них не передбачався. Мережі мовного типу дотепер широко використовуються для розподілу фінансової і ділової інформації, біржових зведень, передачі газетних смуг, у системах асиметричного доступу в Інтернет.

*Друге покоління* наземних станцій VSAT характеризується тим, що вони можуть підтримувати двосторонній (дуплексний) зв'язок. Ці термінали використовуються банківськими і фінансовими організаціями в мережах обміну даними, мережами роздрібної і оптової торгівлі, промисловими підприємствами для зв'язку з філіями і постачальниками, а також для організації високошвидкісного двостороннього доступу в Інтернет та операторами зв'язку для створення виділених магістральних каналів між віддаленими вузлами з великим обсягом обміну даними. Більшість з них працює в Ku-діапазоні частот, хоча в деяких країнах, як і раніше, використовується С-діапазон частот.

Широке поширення одержали термінали *третього покоління* з антенами діаметром 1,2 м і менше. Вони використовуються у великих мережах, що відрізняються низьким рівнем непостійного трафіку між ними. Такі термінали прості по конструкції, відрізняються низькою ціною і працюють винятково в Ku-діапазоні частот.

В останні роки на ринку з'явилося *четверте покоління* VSAT для мультимедійних додатків (USAT – Ultra Small Aperture Terminal). Вони працюють у Ku- і Ka-діапазонах частот і забезпечують швидкість до декількох мегабіт у секунду. При цьому розмір їхніх антен (у Ka-діапазоні частот) становить до 70 см.

#### 4.5 Архітектура мереж VSAT

Архітектури мереж супутникового зв'язку розрізняються по конфігурації трафіку та за структурою управління.

*Мережа "крапка – крапка"* (рис.4.5) дозволяє забезпечувати прямий дуплексний зв'язок між двома віддаленими абонентськими станціями по виділенім каналам. Така схема зв'язку найбільш ефективна при великому завантаженні каналів (не менше 30 – 40%).

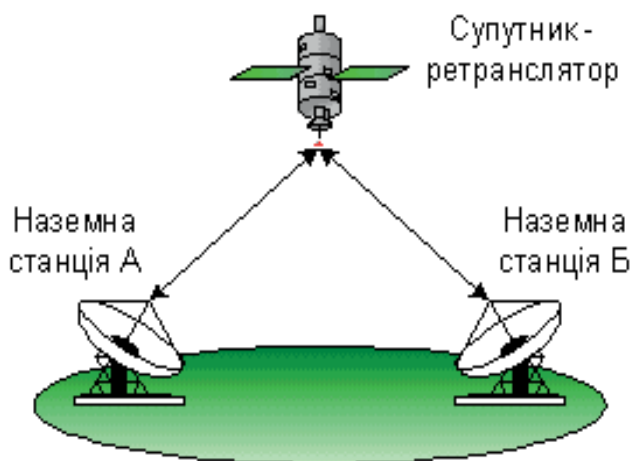


Рисунок 4.5 – Топологія "крапка–крапка"

Перевагою такої архітектури є простота організації каналів зв'язку і їхня повна прозорість для різних протоколів обміну. Крім того, така мережа не вимагає системи керування.

Мережі "кожний з кожним" (рис.4.6) або повнозв'язні мережі, забезпечують прямі з'єднання між будь-якими абонентськими станціями (так званий "однострибковий" режим зв'язку).



Рисунок 4.6 – Топологія "кожний з кожним"

Кількість необхідних дуплексних радіоканалів дорівнює:

$$n = N \times (N - 1), \quad (4.1)$$

де  $N$  – число абонентських станцій у мережі.

При цьому кожна абонентська станція повинна мати  $(N-1)$  каналів прийому–передачі.

Така архітектура оптимальна для телефонних мереж, створюваних у важкодоступних чи віддалених районах, а також для мереж передачі даних з відносно невеликим числом віддалених терміналів (до 30 терміналів) з високим трафіком між абонентами.

У зв'язку з тим, що для роботи між двома малими терміналами від VSAT вимагаються значні енергетичні ресурси в порівнянні з мережею "зірка", у мережах типу "кожний з кожним" на абонентських станціях доводиться використовувати більш потужні передавачі й антени більшого діаметру, що помітно відображується на їхній ціні.

В таких мережах реалізується децентралізований варіант керування мережею – центральна керуюча станція відсутня, а елементи системи керування входять до складу кожної VSAT станції. Ця схема керування доцільна лише при створенні невеликих мереж (до 30 терміналів) з високим трафіком між абонентами.

Мережа типу "зірка" (рис. 4.7) є найбільш розповсюдженою архітектурою побудови супутникових систем зв'язку з абонентськими станціями класу VSAT. Така мережа забезпечує багатонаправлений радіальний трафік між центральною наземною станцією (ЦЗС або HUB (англ.)) і віддаленими периферійними станціями (терміналами). ЦЗС оснащена антеною великого діаметру і потужним передавачем.

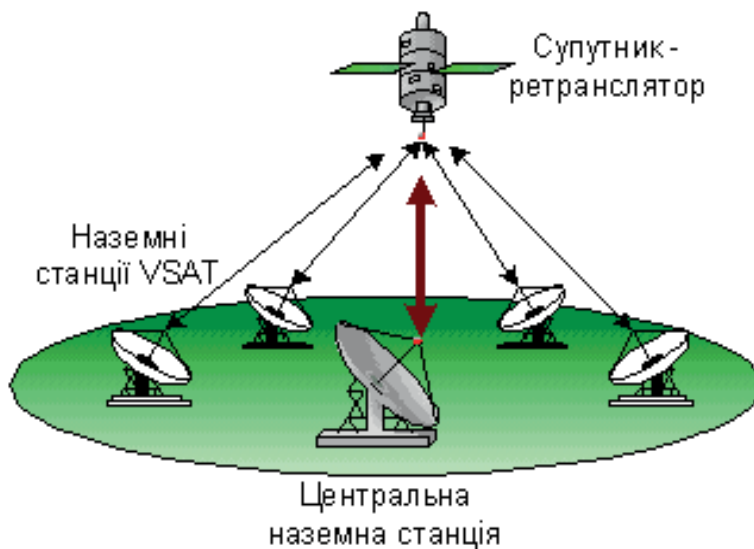


Рисунок 4.7 – Топологія "зірка"

Недоліком архітектури "зірка" є наявність подвійного стрибка при зв'язку між терміналами мережі, що призводить до помітних затримок сигналу.

Мережі VSAT подібної архітектури широко використовуються для побудови корпоративних мереж різних транспортних, виробничих і фінансових установ для організації інформаційного обміну між великим числом віддалених терміналів (що не мають істотного взаємного трафіку) і центральним офісом фірми. Аналогічно будуються мережі телефонного зв'язку для обслуговування віддалених абонентів. Вихід на телефонну комутовану мережу загального користування здійснюється через центральну станцію, підключену до наземного центру комутації чи АТС.

Функції контролю і керування в мережі типу "зірка" зазвичай централізовані і зосереджені в центральній керуючій станції мережі (ЦЗС). Ресурси однієї ЦЗС можуть використовуватися декількома автономними підмережами VSAT (загальна ємність мереж до 10 тис. терміналів).

Кожна з описаних топологій має свої переваги і недоліки. У реальних ситуаціях часто потрібне надання широкого спектру послуг, кожна з яких краще реалізується в різних топологіях. Тому багато мереж будуються за змішаним типом.

## **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Призначення фіксованих супутникових служб.
2. На якій базі будуються мережі VSAT?
3. Недоліки архітектури «зірка».
4. Що можна будувати на основі VSAT?
5. Варіанти організації доступу в Інтернет за допомогою ССЗ.
6. Які особливості використання протоколу Frame Relay?
7. Структура станції VSAT .
8. Що відноситься до систем фіксованого супутникового зв'язку?
9. Переваги мережі «крапка–крапка».
10. Яка мережа забезпечує так званий «однострибковий» режим зв'язку?

## **5 СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

### **5.1 Мобільний радіотелефонний супутниковий зв'язок**

Мобільні супутникові служби (МСС) використовуються для зв'язку з рухомими об'єктами.

Регламентом радіозв'язку для систем персонального супутникового зв'язку виділені діапазони частот до 1 ГГц, а також смуги частот у діапазонах L (1,5/1,6 ГГц) і S (1,9/2,2 і 2,4/2,5 ГГц). У перспективі розроблювачі систем мають намір використовувати більш високочастотні діапазони Ka (20/30 ГГц) і EHF (40–50 ГГц).

Перші супутникові системи мобільного зв'язку розроблялися як системи спеціального призначення (морські, повітряні, автомобільні і залізничні) і були орієнтовані на обмежене число користувачів. Вони будувалися з використанням геостационарних супутників і мали низьку пропускну здатність.

Якісний стрибок у розвитку персональних супутникових систем відбувся в зв'язку з впровадженням цифрових методів передачі мови і даних. Нові можливості для мобільного супутникового зв'язку відкрились із впровадженням проектів супутникових систем на не геостационарних орбітах (низьких кругових і середньовисоких). Орбіти таких супутників близькі до поверхні Землі, що дає можливість використовувати дешеві малогабаритні термінали і невеликі антени. Сучасні системи мобільного супутникового зв'язку орієнтовані на масового споживача.

В даний час зберігається розподіл систем мобільного супутникового зв'язку за видами переданої інформації на:

- мережі радіотелефонного зв'язку (Inmarsat–A, –B і –M, AMSC, MSAT, Optus, Ace)
- системи передачі даних для диспетчеризації транспорту (Inmarsat–C, Omnitrac, Eutetracs).

#### **Мобільний радіотелефонний супутниковий зв'язок**

Для того, щоб користуватися радіотелефонним супутниковим зв'язком, абонент має заключити договір з компанією–оператором, що надає таку послугу. В Україні це "Турая–Україна" (Thuraya) і "Елсаком–Україна" (GlobalStar).

Мобільний супутниковий радіотелефон – це, зазвичай, двостандартний телефон, що підтримує, крім стандарту супутникового зв'язку, ще якийсь із стандартів стільникового зв'язку, наприклад, (GSM–900/Globalstar).

Абонентові послуги мобільного супутникового зв'язку будуть доступні якісний телефонний зв'язок (за необхідності, відеозв'язок) практично з будь-якої ділянки земної кулі. Це досягається безпосередньою передачею радіосигналу з телефонного апарата на один із супутників тієї або іншої глобальної системи зв'язку (рис.5.1).



Рисунок 5.1 – Схема мобільного супутникового зв'язку

Крім передачі голосу, абонентам надаються також послуги: служби коротких повідомлень, голосова пошта і переадресація, визначення місця розташування, очікування й утримання виклику, глобальний роумінг і закриті абонентські групи.

Проте, технологія супутникового зв'язку накладає ряд обмежень. Зокрема, у супутниковому режимі телефон не працює всередині будинку, не приймає вхідні виклики при складеній супутниковій антені, нестабільно працює тоді, коли високі перешкоди затуляють значну частину неба (наприклад, на вузьких вулицях з високими будинками, у густому лісі і т.д.).

Тому в абонентів на сьогодні користуються попитом двостандартні телефони. Коли абонент знаходиться в зоні дії стільникової мережі – телефон працює за стандартом стільникового зв'язку, а у випадку відсутності стільникової мережі чи поганої якості зв'язку можна переключитися у супутниковий режим роботи (якщо абонент знаходиться на відкритому просторі).

Відмінними рисами сучасних систем супутникового радіотелефонного зв'язку є:

- застосування цифрових технологій для передачі мови і даних, підвищення якості і надійності зв'язку, розширення спектру послуг;
- інтеграція з традиційними наземними системами мобільного зв'язку (у першу чергу – з цифровими стільниковими);
- сумісність і взаємодія мереж мобільного супутникового радіозв'язку з телефонною мережею загального користування на будь-якому ієрархічному рівні (місцевому, внутрішньозоновому, міжміському);

- різноманіття типів абонентських терміналів різних категорій – стаціонарні, портативні, мобільні, приймальні і т. д.

На сьогоднішній день у світі нараховується більше 30 національних і міжнародних (регіональних і глобальних) проєктів, призначених для радіотелефонного супутникового зв'язку (як вдалих так і не дуже). Серед них найбільш відомі: Globalstar, Iridium, ICO, Інмарсат, Orbcomm (США), ELLIPSO, Thuraya, а також російські низькоорбітальні "Гонець" і "Сигнал" та геостаціонарні "Банкір" і "Ямал".

## 5.2 Системи Турая, Globalstar, Ірідіум

Мобільна супутникова система Турая є проєктом компанії Hughes Inc. (HSCI), що входить до складу корпорації Boeing.

Космічний сегмент системи складається з супутника "Турая 1" (запущений 21 жовтня 2000 року), розташованого на геостаціонарній орбіті в 36000 км від екватора. Зона покриття системи включає 99 країн Європи, Північної і Центральної Африки, Середнього сходу, Центральної Азії та Індії.

Наземна станція сполучення з телефонною мережею (gateway), розташована в ОАЕ, діє як операційний центр для мобільних супутникових систем.

Система призначена для надання послуг мобільного супутникового зв'язку (передача голосу, факсів, даних, визначення місця розташування, аварійні служби). Супутник Турая, забезпечує пропускну здатність мережі до 13750 одночасно використовуваних телефонних каналів.

Портативні термінали Турая (рис. 5.2) забезпечують роботу в двох режимах: безпосередньо через супутник та через наземну стільникову мережу GSM. Вони схожі зі стільниковими GSM-телефонами за розмірами, зовнішнім виглядом і за якістю передачі голосу.



Рисунок 5.2 – Термінали системи Турая

Абонентські термінали працюють на частотах:

- Земля – космос 1626,5 – 1660,5 МГц,
- космос – Земля 1525,0 – 1559,0 МГц;

Фідерні лінії зв'язку:

- Земля – космос 6425,0 – 6725,0 МГц,
- космос – Земля 3400,0 – 3525,0 МГц.

Як метод доступу використовується FDAMA\TDMA, швидкість передачі даних – до 9.6 кбіт/с.

### **Система Globalstar**

Globalstar – консорціум з міжнародних телекомунікаційних компаній, заснований у 1991 році. Система Globalstar розроблена з метою надання високоякісних супутникових послуг для широкого кола користувачів, що включають голосовий зв'язок, службу коротких повідомлень, роумінг, позиціонування, факсимільний зв'язок, передачу даних, а також визначення місця розташування й асинхронну передачу факсимільних повідомлень і даних зі швидкістю до 9.6 Кбіт/с. Тобто, за допомогою системи Globalstar можливе не лише надання послуг мобільного радіотелефонного супутникового зв'язку, але й побудова систем диспетчеризації та корпоративних мереж передачі даних.

Супутникове угруповання Globalstar складається з 48 основних і 4-х запасних супутників, що розташовуються на низькій орбіті, на висоті 1414 км від поверхні Землі.

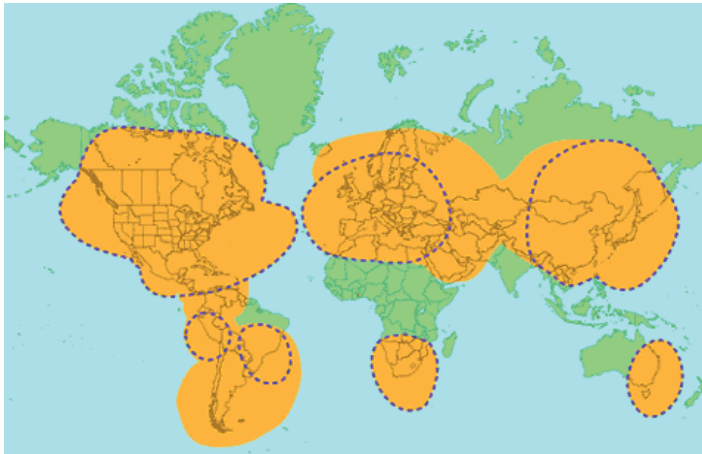


Рисунок 5.3 – Карта покриття системи GlobalStar

У системі Globalstar застосовуються абонентські термінали декількох типів:

- портативні (трубка в руці), аналогічні стільниковим телефонам (наприклад, Telit SAT550 на рис. 5.4);
- мобільні (установлювані на рухомому засобі);
- стаціонарні (рис. 5.5) телефонні апарати, концентратори, таксофони.



Рисунок 5.4 – Telit SAT550



Рисунок 5.5 – Qualcomm GSP2800

Портативні і мобільні абонентські термінали можуть підтримувати декілька стандартів – для роботи не лише в системі Globalstar, а і в стільникових мережах:

- Globalstar / AMPS / CDMA трьохмодові термінали;
- Globalstar / GSM двохмодові термінали;
- Globalstar одномодові термінали.

Портативні супутникові телефони Globalstar лише не набагато більші існуючих стільникових телефонів і виготовляються трьома провідними виробниками: Ericsson, Qualcomm і Telital.

В Україні послуга супутникового радіотелефонного зв'язку з використанням системи Globalstar надається оператором “Елсаком–Україна” сумісно з стільниковим оператором “Київстар GSM”.

### **Система Ірідіум**

Компанія Iridium LLC (заснована в 1991, в проект інвестовано близько 7 мільярдів доларів 19 стратегічними компаніями–партнерами) почала надання послуг в листопаді 1998 р.

За допомогою 66 низькоорбітальних супутників (і 6 запасних) забезпечувалось 100% покриття Землі. Система була розроблена для надання набору стандартних телефонних послуг – голосовий зв'язок, передача факсимільних повідомлень, даних і пейджингу. Підтримувалась міжсупутникова передача сигналів, що забезпечувало неперервність зв'язку.

Телефони Ірідіум забезпечували високоякісне з'єднання для голосового зв'язку й припускали інтерфейсне з'єднання з ноутбуками, електронними органайзерами й іншим телекомунікаційним устаткуванням. Портативний супутниковий телефон Ірідіум працював у двох режимах – стільниковому і супутниковому. Розміри, вага і час роботи від акумулятора близькі до стільникових телефонів. Пейджер Ірідіум забезпечував глобальний роумінг.

Проте, в березні 2000 року компанія оголосила про припинення обслуговування абонентів. Проект економічно себе не виправдав. З одного боку, почався бурхливий розвиток мереж стільникових операторів з конкурентоздатними цінами на послуги зв'язку. З іншого боку, не на користь супутникових телефонів зіграла необхідність виходу на відкриту місцевість для дзвінка. В усякому разі, набралась досить невелика абонентська база. В результаті проект, орієнтований лише на надання послуг мобільного радіозв'язку, виявився не рентабельним і не прибутковим [16]. Тому систему було викуплено з метою переорієнтації її на надання і інших видів послуг.

## **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Для чого розроблялися перші супутникові системи мобільного зв'язку?
2. Режим роботи портативних терміналів Thuraya.
3. Що таке мобільний супутниковий радіотелефон?
4. Які типи терміналів застосовуються у системі Globalstar?
5. Відмінні риси сучасних систем супутникового радіотелефонного зв'язку.

## 6 МІЖНАРОДНІ КОНСОРЦІУМИ В ССЗ

### 6.1 Intelsat

Консорціум Intelsat (The International Telecommunications Satellite Organization) – найстарший і найбільший, утворений у 1964 році з метою надання державам–учасникам консорціуму (в основному – країнам, що розвиваються) сучасних технологій зв'язку. Intelsat – це організація, що включає більше 120 країн повних учасників і близько 60 країн – асоційованих учасників.

Перший комерційний супутник Early Bird був виведений Intelsat на орбіту в квітні 1965 року. До червня того ж року супутник офіційно почав передачу по 240 телефонним каналам, що еквівалентно одному телевізійному каналу по ширині смуги. Intelsat є системою із 20 супутників на геостационарних орбітах, що розташовуються над Атлантикою, Індійським і Тихим океанами і покривають територію приблизно 200 країн світу.

Керуючі станції системи розміщені на території США, Німеччини та Гонконгу. Наземний сегмент Intelsat включає понад 18 000 наземних станцій (з них близько 800 великих станцій, розміщених у 170 країнах світу), користувацький – мільйони VSAT та домашніх антен.

Завдяки цій глобальній системі можливе надання наступних послуг:

- широкосмугові супутникові канали на базі технології VSAT;
- відеослужби: прямі трансляції з віддалених майданчиків у будь-якому місці світу;
- служби передачі голосу і даних: телефон, телефакс, відеоконференц-зв'язок і передача мультимедіа-трафіку;
- Інтернет-служби.

Тисячі наземних станцій на всіх континентах забезпечують стійкий і надійний зв'язок із клієнтами. Послугами Intelsat користуються такі найбільші телерадіокомпанії, як DBS, BBC, CNN, Європейський і Азіатський Союз радіомовлення. Для організації телефонного зв'язку до послуг Intelsat вдаються корпорації France Telecom і Deutsche Telekom. Система використовується для передачі інформації банками і найбільшими редакціями і видавництвами (International Herald Tribune, Financial Times, Wall Street Journal).

### 6.2 Eutelsat

Консорціум Eutelsat (The European Telecommunications Satellite Organization) був утворений 1977 року для передачі телефонних викликів і європейських телевізійних програм на континенті.

Основний центр організації знаходиться в Парижі, має філії в Бразилії, Італії, Німеччині і Сполучених Штатах, також комерційну структуру у Великобританії. На сьогодні в організації є працівники з 24 різних країн.

З 1994 році учасниками Eutelsat є 36 держав Європи, у даний час країни східної Європи теж стають повноправними учасниками консорціуму.

Космічний сегмент Eutelsat складається з 24 супутників, що знаходяться на геостаціонарних орбітах (рис.6.2). З них 20 – власних. Сучасна технологічна програма Eutelsat починаючи з 1998 року переорієнтована на супутники третього покоління Eutelsat III, що надають розширені операційні можливості і призначені для використання в двадцять першому столітті. Покриття системи охоплює Європу, Близький Схід, Африку, Азію, східну Північну Америку, і Південну Америку.

Організація надає послуги через мережу партнерів, провідних

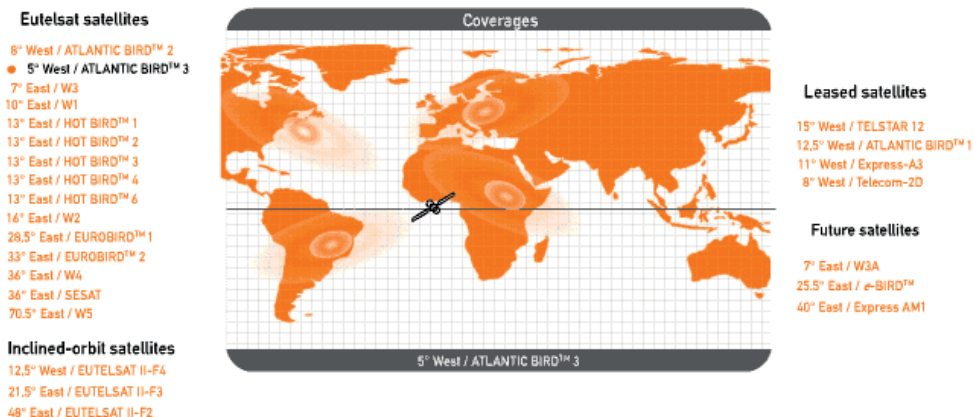


Рисунок 6.2 – Карта покриття одним із супутників системи Eutelsat

телекомунікаційних операторів, таких як Deutsche Telekom, France Telecom (Globecast), Telespazio, Xantic та ін.

Серед послуг, що надаються Eutelsat: Цифрове Відео та Радіомовлення (DVB стандарт – проект OPENKSY); супутниковий Інтернет та мультимедія, побудова корпоративних мереж (у тому числі IP, VSAT, DAMA), позиціонування мобільних об'єктів (проект EutelTRACST™) та ін.

Eutelsat надає більш ніж 1250 суспільних і приватних телевізійних каналів (наприклад, BBC, France Télévision, Deutsche Welle, TF1, CNN, BSkyB, TPS, Cyfra+ та ін.), 650 радіостанцій. 750 корпоративних мереж обслуговують клієнтів в секторах фінансів, енергетики, мас-медіа (серед них: Volkswagen, Renault-F1, Total Elf Fina, Reuters, AFP, International Herald Tribune, Auchan, Atos-Euronext та ін.).

### 6.3 Inmarsat

Консорціум Inmarsat (The International Marine Satellite Organization), зараз Міжнародна Організація Мобільного Супутникового Зв'язку, утворений у 1979 році на прохання Міжнародної морської організації (ІМО) з метою організації супутникового зв'язку для морських судів і авіаційної техніки. На сьогоднішній

день організація має штаб–квартиру в Лондоні і поєднує 86 країн. Штат Інмарсат складає більше 400 чоловік 56 різних національностей.

Система Інмарсат складається з дев'яти супутників, що знаходяться на геостационарній орбіті. Чотири супутники третього покоління Інмарсат–3 формують зони покриття, які перекривають одна одну (без урахування екстремальних полюсних зон). Інші використовуються як запасні. Таким чином, система забезпечує глобальне (близько 98% ) покриття земної поверхні (рис.6.3).

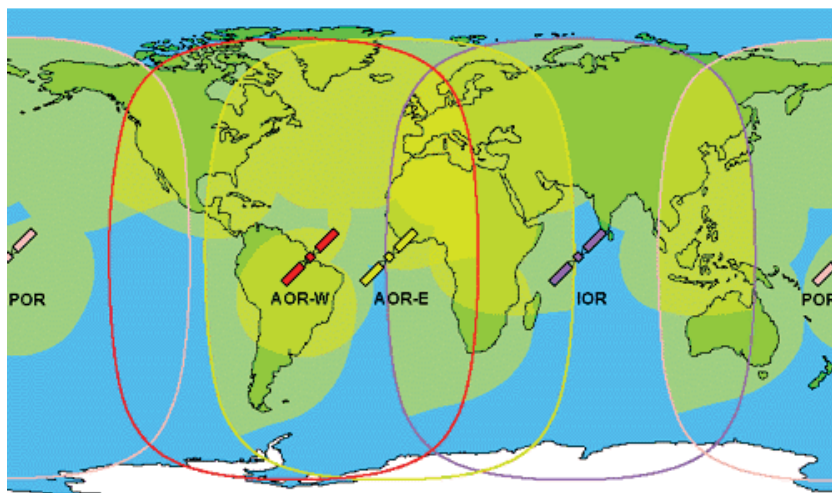


Рисунок 6.3 – Карта покриття системи Inmarsat

Послуги зв'язку в Інмарсат підрозділяються на кілька видів, так званих сервісів, або стандартів: **Інмарсат–А** і **Інмарсат–В** (аналогова і цифрова телефонія, високошвидкісна передача даних і факсів), **Інмарсат–С** (низькошвидкісна передача цифрових даних, застосовується для побудови систем диспетчерського контролю за наземним транспортом та морськими судами), **Інмарсат–D/D+** (глобальний пейджинг), **Inmarsat–E** (передача сигналів порятунку морських судів), **Aero–С, Н, I, L, mini–M** (для систем диспетчерського контролю за літаками та забезпечення голосового і факсимільного зв'язку, а також передачі даних), **Inmarsat M/mini–M/M4** (персональні супутникові телефони, голосовий зв'язок, передача даних і факсів) та ін.

Більша частина супутникових телефонів системи Інмарсат виробляється фірмами "Trane&Trane" і "NERA WorldPhone". На рисунку 6.4 та 6.5 показано супутникові термінали для роботи в стандарті Inmarsat–M4.



Рисунок 6.4 – TT-3060A



Рисунок 6.5 – TT-3062D – автомобільний варіант

З використанням стандартів Інмарсат можна передавати дані (Інмарсат Міні-М – 2,4 Кбіт/с, Інмарсат А і Інмарсат-В – 56/64 Кбіт/с, Інмарсат М4 – 64 Кбіт/с), вартість передачі в різних стандартах теж відрізняється.

## 6.4 Інтерспутник

Міжнародна організація космічного зв'язку "Інтерспутник" була створена в листопаді 1971 року, коли дев'ять країн підписали угоду про утворення єдиної системи супутникового зв'язку. На сьогодні "Інтерспутник" – це відкрита міжнародна організація, членами якої є 24 країни (бувші країни СРСР, у тому числі і Україна, а також Німеччина, Угорщина, Румунія, Чехія, В'єтнам, Афганістан, Йемен, Лаос, Нікарагуа, Сирія, Корея, Індія, Куба та ін.). Держави, що входять до організації "Інтерспутник" зображені на рис 6.6.

Штаб-квартира "Інтерспутника" розташована в Москві, забезпечує практичне здійснення всіх технічних, комерційних і юридичних аспектів діяльності організації, а також координує діяльність регіональних представництв "Інтерспутника" у різних країнах. "Інтерспутник" здійснює активне співробітництво із всесвітніми і регіональними організаціями, серед яких ООН, МСЕ, ЮНЕСКО, APSCC.

Космічний сегмент "Інтерспутника" містить у собі орендовані в Російської Федерації три супутники зв'язку типу "Експрес-А", а також супутник нового покоління LMI-1, створений у рамках СП "Локхид Мартін Інтерспутник". Супутники розташовані на дузі геостаціонарної орбіти від 11 град. з.д. до 80 град. в.д.

У липні 2002 року "Інтерспутник" і компанія Eutelsat уклали дистриб'юторську угоду, на підставі якої "Інтерспутнику" надаються права на продаж супутникової ємності і послуг системи Eutelsat, до складу якої сьогодні входить 21 супутник зв'язку.

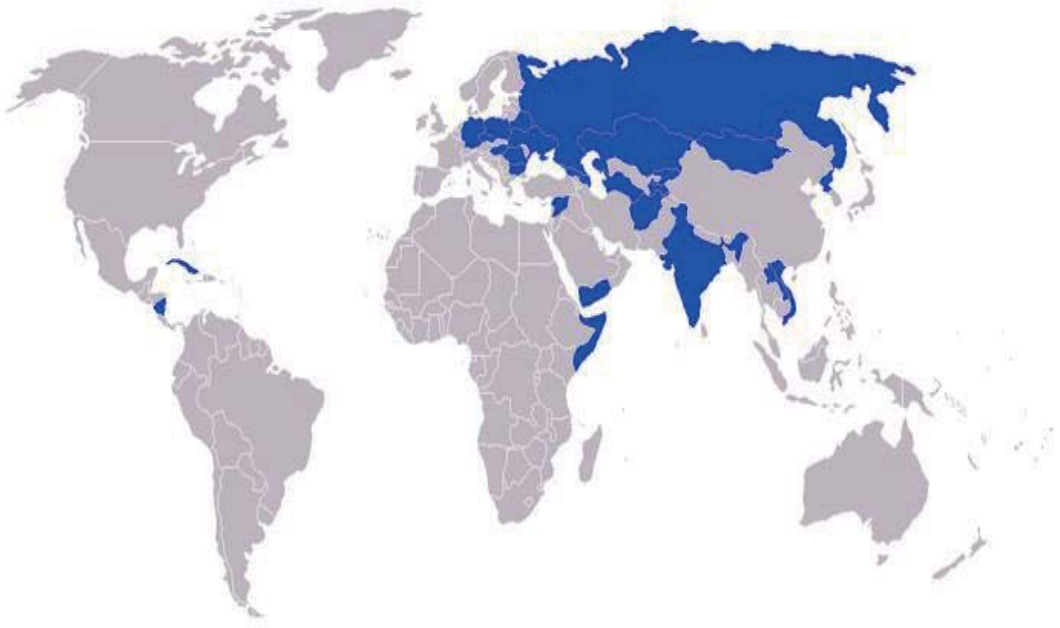


Рисунок 6.6 – Держави, що входять до організації "Інтерспутник"

Наземний сегмент містить у собі:

- наземні станції супутникового зв'язку,
- контрольні станції,
- наземний комплекс керування супутниками.

"Інтерспутник" пропонує операторам зв'язку і мовним компаніям ємність на супутниках нового покоління для організації широкого спектру телекомунікаційних послуг, таких як телевізійне і радіомовлення, передача голосових повідомлень і даних, відеоконференц-зв'язок і підключення до Інтернет у мережах загального користування і виділених мереж.

У коло користувачів системи "Інтерспутник" входять державні і приватні телекомунікаційні і мовні компанії, а також компанії-провайдери послуг багатьох країн світу.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Послуги Eutelsat.
2. Для чого розроблена система Глобалстар?
3. Склад системи Inmarsat.
4. Які послуги надає система Intelsat?
5. Види сервісів в Inmarsat.
6. Для чого була розроблена система Ірідіум?
7. З чого складається космічний сегмент Eutelsat?
8. Наземний сегмент Інтерспутника.

## 7 СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ

### 7.1 Поняття про супутникові радіонавігаційні системи

Глобальні супутникові системи позиціонування GPS (Global Positioning Systems) призначені для визначення координат об'єкта на місцевості. Іншою назвою таких систем є СРНС – супутникові радіонавігаційні системи.

Найбільш відомими глобальними системами позиціонування є Navstar GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), а також європейський проект Galileo та китайський BeiDou.

На сьогоднішній день досить часто GPS–системи використовуються в інтеграції з системами радіозв'язку (супутниковими і стільниковими) та інерційними навігаційними системами. Це дозволяє використовувати радіоканали для передачі додаткової інформації, а також підвищити точність і вірогідність визначення координат.

Послугу GPS надають такі відомі мобільні супутникові системи як Thuraya, Inmarsat, Globalstar та ін.

Супутникова навігація може мати різноманітні застосування. Це:

- персональні системи навігації;
- диспетчерські навігаційні системи;
- системи моніторингу морського транспорту.
- топографія та ін.

Такі пристрої призначені для індивідуального використання, найчастіше використовуються водіями автомобільного транспорту. Досить розповсюджені приймачі СРНС, що мають розмір кишенькового калькулятора з клавіатурою і рідкокристалічним дисплеєм, на якому відображаються координати користувача, курс, відстань і напрямок до контрольних пунктів маршруту, пройдений маршрут, карта місцевості, параметри видимих супутників.

Для індивідуального користування розроблені також пристрої, що являють собою спеціальні портативні комп'ютери з навігаційною програмою і цифровою картою, фрагмент якої висвічується на дисплеї. Прикладом можуть служити Philips Carin (Philips), "Autopilot Systems" (Bosch), Rino 120 (Garmin) та ін. Такі прилади є своєрідними електронними лоцманами, деякі з них можуть давати вказівки водію синтезованим голосом, заздалегідь повідомляючи про всі повороти, стоянки й інші особливості даного маршруту. Для точного визначення свого місцезнаходження комп'ютер отримує інформацію від трьох джерел: від GPS–приймача, від електронного компаса і від датчиків пройденого шляху, встановлених на колесах. Інформація уточнюється за допомогою бази даних на магнітній картці.

Найбільше поширення ці системи одержали в європейських країнах, де, майже, для будь-якої місцевості складені електронні цифрові карти. На сьогоднішній день на ринку пропонуються також цифрові карти України, її областей та міст, які можна використовувати в GPS–системах.

Глобальна система визначення місцеположення (GPS) NAVSTAR є всепогодною космічною системою, яка розвивається Міністерством оборони

США для неперервного забезпечення збройних сил, розташованих у будь-якому місці на Землі або поблизу неї, високоточними даними про їх положення, швидкість та час у єдиній системі відліку. Як бачимо, використання системи не залежить ні від погодних умов, ні від пори року, ні від часу доби. Обмеження використання СРНС можуть виникнути лише при перекриванні частини небосхилу перешкодою (зникненню прямої видимості супутника). Таке саме визначення можна дати і системі ГЛОНАСС, оскільки вона конструктивно ідентична до системи GPS NAVSTAR (далі GPS). Єдиною відмінністю є те, що власником ГЛОНАСС є Міністерство оборони Російської Федерації.

В даний час обидві системи повністю відкриті для цивільного користувача. Супутникові радіонавігаційні системи мають дуже великі можливості і широке використання: морська та повітряна навігація, сухопутний транспорт, геодезичні вимірювання, картографія, екологічний, промисловий і сільськогосподарський моніторинг, всесвітня служба точного часу тощо. Перевагами СРНС є можливість їх цілодобового використання в будь-якій точці поверхні Землі чи навколишнього простору, її всепогодність та доступність.

Оскільки системи GPS і ГЛОНАСС мають однакову будову і відрізняються лише числовими параметрами, а також враховуючи, що про систему GPS існує більше даних і вона більш розвинута, то основну увагу ми будемо приділяти саме цій системі. Паралельно будемо також наводити дані і про систему ГЛОНАСС.

СРНС GPS, вже починаючи з 1983 року, почала активно використовуватись цивільними користувачами, навіть, не дивлячись на те, що повністю розгорнута вона була лише в 1995р. Першого травня 2000 р. указом президента США GPS була повністю відкрита для цивільних користувачів. Це призвело до різкого збільшення кількості цивільних користувачів, особливо при використанні приймачів в геодезичному і топографічному зніманні.

Російська супутникова навігаційна система ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система) розроблена Міністерством оборони колишнього СРСР. Впроваджена для використання з 1990 р., проте вона повністю ще не розгорнута. ГЛОНАСС також повністю відкрита для цивільного користувача

Визначення координат приймачем засновано на динамічній просторовій засічці при отриманні ним сигналів від, щонайменше, чотирьох супутників. При цьому GPS — приймач дозволяє визначити координати об'єкта, швидкість його руху і точний час.

Для використання динамічної просторової засічки необхідно постійно знати координати супутників. Радіопередавачі ШСЗ неперервно передають сигнали в напрямку Землі. Ці сигнали несуть інформацію про миттєві координати супутників і час виходу сигналу із системи супутника. Сигнали, надіслані від різних супутників одночасно, приймаються відповідними приймачами, що розташовані на земній поверхні у точках із шуканими координатами. Приймачі фіксують час приходу сигналу на антену приймача і, використовуючи швидкість поширення радіосигналу у просторі, визначають миттєву відстань до супутника. Знайшовши одночасні миттєві відстані до 4-х

супутників і використовуючи їх миттєві координати, розв'язується пряма просторова засічка, з якої знаходять геоцентричні координати пункту спостереження і точний час.

## 7.2 Будова GPS і ГЛОНАСС

Системи GPS і ГЛОНАСС мають подібну архітектуру та принципи дії і складаються з 3 сегментів (рис.7.1):

1 – космічного сегменту, який складається з штучних супутників Землі, що передають радіосигнали на Землю;

2 – контрольного сегменту, який стежить за функціонуванням всієї системи;

3 – сегменту користувача, до складу якого входять приймачі різних типів.

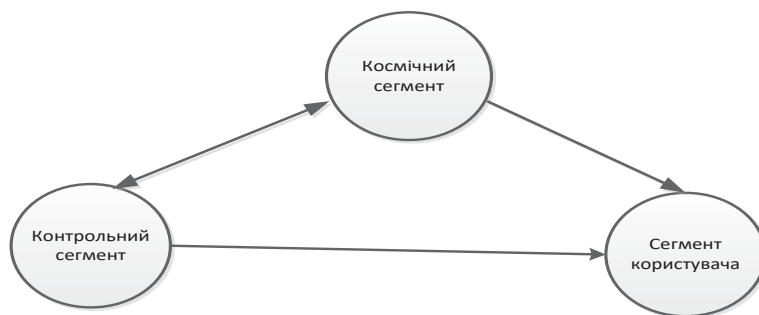


Рисунок 7.1 – Взаємодія сегментів СРНС

Кожен із сегментів виконує дуже важливі функції і чітка робота СРНС можлива лише при правильній взаємодії всіх сегментів.

### 7.2.1 Космічний сегмент

Космічний сегмент СРНС – це вся сукупність ШСЗ.

Космічний сегмент GPS являє собою систему з 24 ШСЗ, розподілених по шести майже колових орбітах (з ексцентриситетом  $f < 0,01$ ) з висотою біля 20200 км. Існують п'ять класів супутників GPS: Block I, Block II, Block IIА, Block IIR, Block IIF. Середня кутова відстань між вузлами орбіт супутників  $60^\circ$ , нахил орбіт до площини екватора  $55^\circ$ . ШСЗ обертаються навколо Землі як одне ціле, не змінюючи своїх взаємних положень. Період обертання супутників близько 12 годин.

Проектний космічний сегмент системи ГЛОНАСС складається з 24 супутників, що рухаються на 3 орбітах (рис.7.2).

Космічний сегмент ГЛОНАСС



Космічний сегмент GPS



Рисунок 7.2 – Космічний сегмент систем GPS і ГЛОНАСС

Основні параметри космічних сегментів систем GPS і ГЛОНАСС представлені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 Основні характеристики супутникових навігаційних систем GPS і ГЛОНАСС

| Показник                                      | GPS     | ГЛОНАСС       |
|-----------------------------------------------|---------|---------------|
| Сузір'я супутників                            |         |               |
| Кількість супутників                          | 24(31*) | 24(18**)      |
| Число орбітальних площин                      | 6       | 3             |
| Кількість супутників у кожній площині         | 4       | 8             |
| Висота орбіти, км                             | 20 300  | 19 100        |
| Кут нахилу орбіти, °                          | 55      | 64,8          |
| Період обертання супутника навколо Землі год. | 12      | 11,26         |
| Супутники                                     |         |               |
| Маса КА, кг                                   | 1055    | дані відсутні |
| Потужність сонячних батарей, Вт               | 450     | дані відсутні |
| Термін експлуатації, роки                     | 7.5     | 2–3           |

\* в системі GPS для покращення роботи в умовах міської забудови (при наявності значної кількості перешкод) було вирішено збільшити кількість супутників до 36 — на даний час на орбіті присутні 31 робочий супутник

\*\* в системі ГЛОНАСС в середині 90-х кількість супутників різко зменшилась (був момент, коли лишилось 3 робочі супутники). Проте в останні роки їхня кількість зросла.

Кожен супутник системи GPS випромінює радіосигнали на робочих частотах  $L_1=1575,42$  МГц і  $L_2=1227,60$  МГц. Сигнал на частоті  $L_1$  модульовано P, C/A—кодами, а на частоті  $L_2$  —виключно P—кодом.

Код вільного доступу C/A (Coarse Acquisition) має частоту проходження імпульсів 1,023 МГц і період повторення 0,001 сек. Точність автономних вимірів відстаней від приймача до супутника за допомогою цього коду є невисокою.

Захищений код P (Protected) характеризується частотою проходження імпульсів 10,23 МГц і періодом повторення 7 діб. Американське оборонне відомство вжило заходів додаткового захисту P-коду: у будь-який момент без попередження може бути включений режим AS (Anti Spoofing). При цьому виконується додаткове кодування P-коду, і він перетворюється в Y-код. Розшифровка Y-коду можлива тільки апаратно, з використанням спеціальної мікросхеми, що встановлюється в GPS-приймачах військового призначення.

З метою зниження точності визначення координат несанкціонованими користувачами передбачений так званий "режим вибіркового доступу" SA (Selective Availability). При включенні цього режиму в навігаційне повідомлення навмисно вводиться помилкова інформація про похибки атомних годинників і елементи орбіти супутників, що приводить до суттєвого зниження точності навігаційних визначень.

Основу точності системи становлять атомні годинники або стандарти точного часу. Супутники типу Block II обладнані чотирма стандартами точного часу: двома рубідієвими та двома цезієвими. Високоточні стандарти частоти, які можна назвати серцем усієї електронної системи, застосовуються для генерації коливань на робочій частоті 10,23 МГц. Шляхом множення цієї частоти на 154 та 120 відповідно отримують дві частоти  $L_1$  і  $L_2$ . Двохчастотний характер сигналу важливий для усунення похибки під час визначення псевдовідстані, яка виникає через вплив іоносфери.

Варто зауважити, що існують приймачі, які здатні вловлювати і розшифровувати сигнали обох систем — GPS та ГЛОНАСС. Завдяки цьому вони швидше визначають координати точок з необхідною точністю.

### 7.2.2 Контрольний сегмент

Контрольний сегмент, або сегмент управління СРНС — це комплекс наземних засобів, які забезпечують функціонування космічного сегменту, контролюють його роботу та здійснюють безпосереднє керування всією системою.

Цей сегмент в системі GPS включає контрольно-спостережні станції — головну і додаткові станції безперервного спостереження за ШСЗ. Головним завданням цих станцій є спостереження за супутниками з метою визначення траєкторій ШСЗ та похибок бортових атомних годинників. Крім того, через систему управління здійснюються синхронізація годинників та оновлення даних.

До складу системи контрольних станцій входять:

- головна контрольна станція;
- п'ять станцій стеження (моніторингових);
- три контрольних станції.

Місцем базування головної станції є об'єднаний космічний Центр управління на авіабазі Фалькон, Колорадо–Спрінгз (США). В цьому центрі збираються результати спостережень з усіх станцій спостережень, обчислюються уточнені орбіти навігаційних супутників та оцінюється стан кожного з них і системи в цілому.

Станції спостереження розташовані в місті Колорадо–Спрінгз та на Гавайських островах, островах Вознесіння, Дієго–Гарсія, Кваджалейн (рис.7.3). Станції обладнані цезієвими стандартами частоти і часу та Р–кодovими приймачами і можуть одночасно відслідковувати до 11 супутників. Положення станцій відоме з високою точністю в геоцентричній системі координат WGS–84. На станціях кожні півтори секунди вимірюють псевдовідстані до всіх ШСЗ NAVSTAR, коли ті проходять над горизонтом, визначають вплив атмосфери і пересилають на головну станцію згладжені, виправлені за іоносферну і тропосферну рефракції дані, усереднені за 15хв.



Рисунок 7.3 – Розташування контрольної станції та станції спостереження GPS

Додаткові станції управління розташовані на тих же пунктах, що і станції стеження. Вони служать для передачі повідомлень на супутники. Ефемериди супутників та поправки годинників, визначені на головній станції управління і додаткових станціях передаються на ШСЗ по радіоканалу. Крім того, існує ще багато приватних мереж станцій стеження. Вони не беруть участі в керуванні роботою системи, а лише визначають орбіти супутників.

Подібну структуру і функції має контрольний сегмент ГЛОНАСС, який складається з:

головного наземного командного пункту (Москва); семи командно–вимірювальних пунктів; двох квантово–оптичних вимірювальних пунктів.

### 7.2.3 Сегмент користувача

Сегмент користувачів являє собою всю множину GPS–приймачів. Приймачі мають різну будову, функції та призначення, тому їх розрізняють за різними ознаками.

Оскільки власником системи GPS є МО США, то в першу чергу приймачі поділяються на дві групи:

– PPS (Precise Positioning Service) – для точного визначення місцеположення. До цієї групи відносяться військові користувачі NATO, приймачі яких здатні приймати Y– код позбавлений AS та SA – кодування.

– SPS (Standard Positioning Service) — для стандартного визначення місцеположення. До другої групи відносяться усі цивільні користувачі, приймачі яких приймають сигнали, кодовані функціями AS та SA.

У залежності від призначення приймачі розділять на три групи:

– навігаційні. Приймачі цієї групи миттєво визначають своє місцеположення. Середня квадратична похибка визначення координат навігаційними приймачами при відсутності перешкод та виключеному SA — кодуванні супутникових сигналів не перевищує 10 м, а при включеному SA — кодуванні може досягати 200–300 м.

– геодезичні. Ці приймачі призначені для диференційних вимірів (одночасно виміри проводяться мінімум двома приймачами) і визначення приростів координат між статично закріпленими приймачами. Точність визначення приростів координат може сягати 1 мм.

– спеціальні. Вони можуть мати саме різноманітне призначення, зокрема, визначення точного часу.

В залежності від принципу вимірювання відстаней до супутника приймачі поділяються на кодові та фазові. Деякі приймачі додатково вимірюють доплерівський зсув частоти сигналу.

Приймачі також розділяють на чотири групи за принципом вимірювання відстаней до супутника і типу сигналу, який приймається до опрацювання. Це:

- кодові приймачі;
- фазові приймачі із *CIK* — кодом;
- кодові приймачі із *CIK* та *P* — кодом;
- фазові приймачі із *CIK* та *P*— кодом.

Найчастіше цей поділ спрощують і ділять приймачі на одностотні (приймають *C/A*–код), та двочастотні (приймають *CIK* та *P*— код).

GPS — приймач складається з шести головних блоків (рис.7.5).

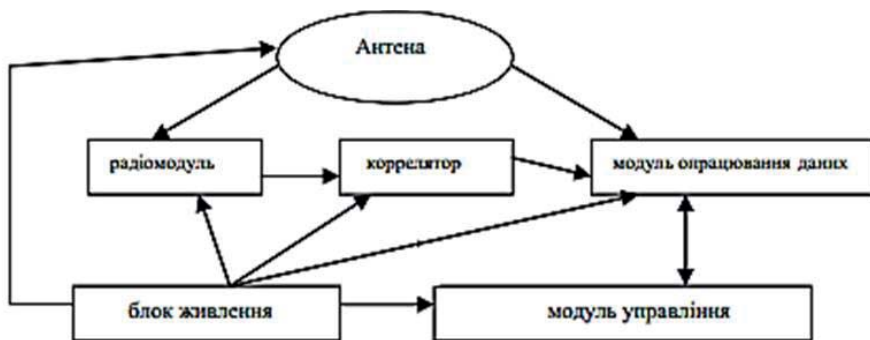


Рисунок 7.4 – Схематична будова GPS приймача

Антенa приймaє GPS–сигнали і передає у радіомодуль. У цьому модулі виконується підсилення сигналів і їх конвертації на низькі частоти. Корелятор призначений для синхронізації затримки і фази сигналу приймача із параметрами прийнятого радіомодулем GPS–сигналу. Сигнали всіх GPS–супутників опрацьовуються одночасно по окремих каналах. На вихід корелятора подаються дані, необхідні для пошуку і визначення супутникового сигналу, здійснення приблизних обчислень і визначення місцеположення приймача. Модуль опрацювання даних виконує алгоритмічним шляхом опрацювання прийнятих сигналів, а також оцінює параметри супутникового сигналу, розраховує місцеположення приймача. Через модуль управління приймачем оператор задає відповідні режими роботи приймача, контролює процес вимірів і їх накопичення у пам'яті приймача. Автономний блок живлення забезпечує роботу усіх блоків.

### **7.3 Диспетчерські інформаційні системи**

Диспетчерські навігаційні системи, призначені для централізованого контролю за пересуванням декількох десятків вантажних автомобілів по території, що обслуговується транспортною компанією.

Диспетчерська інформаційна система (або автоматизована система управління перевезеннями) складається з двох основних частин:

- мобільне обладнання (кожен автомобіль оснащується GPS–приймачем і устаткуванням радіозв'язку для контакту з диспетчерським пунктом);
- обладнання та програмне забезпечення робочого місця диспетчера.

Робота диспетчерської системи супутникової навігації здійснюється наступним чином:

- GPS–супутники з орбіт передають в бік Землі навігаційні сигнали;
- GPS–приймач на транспортному засобі приймає ці сигнали і визначає своє місце розташування;
- дані передаються по радіоканалу в диспетчерський центр. При цьому можуть використовуватися радіоканали як супутникових систем зв'язку, так і стільникових систем;
- диспетчерський центр приймає дані від транспортного засобу, обробляє їх і показує на екрані реальне положення транспортного засобу на карті місцевості.

Паралельно основній інформації по радіоканалу можуть автоматично передаватися дані від різноманітних датчиків, встановлених на вантажному автомобілі: наприклад, про несанкціоноване розкриття контейнерів, про наявність палива, про зупинки, ДТП, аварії, а також кнопок тривоги.

Інформація може йти й у зворотному напрямку – від диспетчера до водія, наприклад, команди про зміну маршруту чи часу доставки вантажу. При цьому послідовність усіх подій і дій персоналу може бути відновлена.

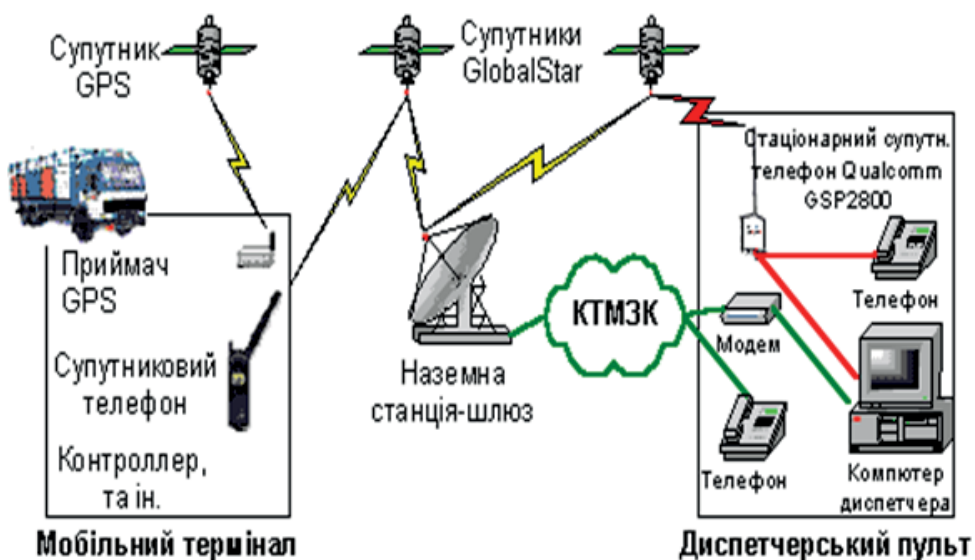


Рисунок 7.5 Схема організації зв'язку в диспетчерській системі

На рисунку 7.6 показана схема організації зв'язку в диспетчерській системі на прикладі використання для радіозв'язку супутникової системи GlobalStar. При цьому показано 2 шляхи інформації від наземної станції – через телефонну мережу і по каналах GlobalStar.

Такі диспетчерські системи, крім транспортних компаній, можуть успішно використовуватися також у пошукових і аварійних службах, рибнагляді, інкасації банків, у МВС і т.п. Елементи цих систем можуть встановлюватися в дорогих моделях автомобілів. У випадку спроби викрадення пристрій автоматично повідомляє координати автомобіля, по яких відповідна служба може його знайти.

Як приклади програмного забезпечення для диспетчерських систем можна назвати: PC Vtrak від Trimble Navigation (США), Logic Dispatch від Simac Systems (Голландія), ECOMM, "Банкомзв'язок" (Україна) та ін. Системи пропонуються рядом українських компаній.

Останнім часом розробляються системи, що використовують GPS і дозволяють працювати через колективний Інтернет-сервер (для радіозв'язку у цьому випадку найчастіше використовується стільниковий зв'язок та WAP-технологія). Наприклад, АСУП SkyCom компанії "Укрсофт".

## 7.4 Розвиток міжнародних навігаційних систем

GPS (попередня назва «NAVSTAR»). Належить міністерству оборони США. Цей факт, на думку більшості держав, є її головним недоліком. Пристрої, що підтримують навігацію через GPS, є найпоширенішими в світі.

ГЛОНАСС належить міністерству оборони РФ. Система, за заявами розробників наземного обладнання, буде мати декілька технічних переваг порівняно з GPS. Після 1996 року супутникове угруповання зменшувалося, і до

2002 року система практично повністю занепала. Була повністю поновлена лише в кінці 2011 року. Відзначається малою розповсюдженістю клієнтського обладнання. До 2025 року передбачена глибока її модернізація.

Galileo – Європейська система, що перебуває на етапі створення супутникового угруповання.

15 грудня 2016 року система Galileo розпочала свою роботу.

Бейдоу розгорнута Китаєм підсистема GNSS, призначена для використання тільки у цій країні. Особливість — невелика кількість супутників, що перебувають на геостационарній орбіті. На 28 грудня 2012 року виведено на орбіту Землі 16 навігаційних супутників, 11 з яких використовується за призначенням. Згідно з планами, до 2012 року вона мала покривати Азіатсько–Тихоокеанський регіон, система «Бейдоу» зможе працювати як глобальна. Реалізація цієї програми почалася 2000 року. Перший супутник вийшов на орбіту в 2007 році.

IRNSS – індійська навігаційна супутникова система (в стані розробки). Пропонується для використання лише в цій країні. Перший супутник був запусканий в 2008 році.

QZSS – первісно японська QZSS була задумана у 2002 р. як комерційна система з набором послуг для мобільного зв'язку, мовлення й широкого використання для навігації в Японії та сусідніх районах Південно–Східної Азії. Перший запуск супутника для QZSS був запланований на 2008 р. В березні 2006 японський уряд оголосив, що перший супутник не буде призначений для комерційного використання й буде запусканий цілком за бюджетні кошти для відпрацювання прийнятих рішень в інтересах забезпечення навігаційних завдань. Тільки після успішного закінчення іспитів першого супутника почнеться черговий етап і наступні супутники будуть повністю забезпечувати запланований раніше обсяг послуг.

В березні 2012 року мережа референтних станцій, що складає наземний компонент навігаційної системи GNSS, запрацювала і в Україні.

## **КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. Назвіть всі існуючі супутникові радіонавігаційні системи?
2. Яку архітектуру мають СРНС?
3. Призначення GPS.
4. Застосування супутникової навігації.
5. Що таке космічний сегмент системи GPS і ГЛОНАСС?
6. Скільки робочих супутників має система GPS і ГЛОНАСС?
7. Яка робота контрольного сегменту СРНС?
8. Назвіть види призначення приймачів СРНС.
9. Поясніть будову та принцип дії GPS — приймача.

## 8 СИНХРОНІЗАЦІЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ПО СУПУТНИКОВИМ СИГНАЛАМ

### 8.1 Супутникові системи і мережі синхронізації

Основне завдання супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) – визначати в глобальних земних масштабах тривимірні координати користувачів і їх швидкість, якщо ці об'єкти рухаються. Ще одним завданням є точна координація часу в масштабах планети, тобто визначення так званого всесвітнього скоординованого часу (Universal Time Coordinated, UTC).

Серед прикладів реалізованих СРНС – американська GPS і російська (колишня радянська) ГЛОНАСС, а також проєктована в ЄС аналогічна система під назвою Galileo. Схожі системи або їх сегменти розроблюються в Індії, Китаї і деяких інших країнах. Активно обговорюється взаємодія різних СРНС між собою, проте це питання доки не можна вважати повністю вирішеним. На сьогодні обидві функціонуючі СРНС надають міжнародній спільноті можливість безкоштовного прийому своїх сигналів, хоча на практиці рядовий споживач частіше використовує сигнали GPS завдяки дещо кращому покриттю земної поверхні і, головне, більшій доступності (дешевизні) приймачів GPS.

Прості приймачі GPS вже досить широко використовуються споживачами України для визначення поточного місця розташування, що дуже зручно для орієнтування на місцевості.

На рисунку 8.1 показана структурна схема системи GPS. Вона складається з наземного і космічного сегментів. Іноді виділяють і третій сегмент – користувацький.



Рисунок 8.1 – Структурна схема системи GPS

Наземний, або контролюючий, сегмент GPS призначений для управління супутниками, а також введення поправок з метою підтримки єдиного часу і єдиної опорної частоти в системі. Сегмент складається з ряду станцій контролю і управління, розташованих, по можливості, рівномірно по усій території Землі, з центром управління в США (уся система GPS контролюється тільки владою США).

Космічний сегмент GPS складається з 24 супутників, що обертаються в шести орбітальних площинах на висоті близько 20 тис. км. Вони забезпечують покриття практично будь-якої точки земної поверхні у будь-який час доби. Установлені на супутниках атомні стандарти частоти 10,23 МГц постачають системі високостабільні опорні сигнали (іноді скориговані поправками наземного сегменту).

Передавальне обладнання супутників виконує передачу навігаційних і службових даних на двох несучих частотах  $L_1$  і  $L_2$ , відповідно рівних 1575,42 і 1227,60 МГц. Дані передаються у вигляді кількох двійкових кодів, що модулюють фазу сигналів несучих частот. При цьому тільки сигнал частоти  $L_1$  модулюється індивідуальним для кожного супутника кодом, що має позначення C/A (Coarse/Acquisition – отримання даних зі зниженою точністю, хоча штучне зниження точності коду C/A останнім часом в GPS вже не здійснюється). Сигнали з кодом C/A – єдині доступні для загального використання. Інший вживаний код (так званий P-код) модулює сигнали обох несучих, але він не призначений для загального застосування і рядовим користувачам його декодування недоступне.

Користувацький сегмент оснащений приймачами сигналу GPS (випускаються сотні, якщо не тисячі різноманітних моделей оптимальних для рішення тих або інших завдань).

Усі приймачі, в залежності від кількості супутників, які одночасно відстежуються, діляться на дві основні групи: *багатоканальні (або паралельні)* і *одноканальні (або послідовні)*. На сьогодні, практично усі приймачі є багатоканальними, тобто одночасно здатні відстежувати багато (як правило, від 8 до 24) супутників, що дозволяє забезпечити відсутність перерви в зв'язку, характерної для послідовних приймачів при переході від одного супутника до іншого, а також надає ряд інших важливих переваг.

Визначення географічних координат – не єдина, хоча і найбільш широко поширена в геодезії і картографії, функція приймачів сигналів супутникових радіонавігаційних систем. В останні роки навігаційні системи на основі GPS активно використовуються для вирішення завдання точної посадки авіатранспорту в умовах відсутності видимості і т. п. Поза сумнівом той факт, що комплексне застосування таких систем надасть транспортним засобам небачені досі можливості. Крім того, можливості GPS як джерела еталонного сигналу точної частоти і точного часу, використовуються для вирішення завдання створення і експлуатації мереж синхронізації цифрових мереж зв'язку.

Супутники GPS обладнані високостабільними атомними стандартами частоти. У більшості випадків – це цезієві стандарти частоти з відносною довгостроковою нестабільністю не більше  $1 \times 10^{-12}$ . Час системи GPS з високою

точністю пов'язаний з UTC, відрізняючись при цьому по абсолютному значенню на кілька секунд.

Приймачами GPS можуть вважатися як, власне, приймальні модулі, які приймають і декодують сигнали GPS, так і закінчені вироби – стандарти частоти або генератори безперервних коливань (синусоїдальної або спеціальної форми) з частотою, "прив'язаною" до частоти GPS. Останні містять у своєму складі приймальні модулі, а також додаткові пристрої на основі кварцевих або рубідієвих генераторів. Такі стандарти частоти поєднують у собі переваги різних автономних стандартів з відносно невисокою вартістю. Наприклад, рубідієвий стандарт частоти СЧР– 102, виробництва Української компанії "Інформаційні системні технології", забезпечує як короткочасну нестабільність рубідієвого стандарту ( $3 \times 10^{-12}$  за 1 с), так і аналогічну довготривалу (добову) нестабільність якраз за рахунок використання вбудованого модуля приймача GPS, що коригує частоту рубідієвого генератора.

Типовий приймальний модуль GPS призначений для відслідковування одночасно 8 або 12 супутників, напруга його живлення складає 3 або 5 В при величині струму близько сотень міліампер.

Висока точність міток часу в GPS досягається тільки на тривалих часових інтервалах (кілька годин, доба) шляхом статистичної обробки сигналів супутникових радіонавігаційних систем. Для того, щоб досягти аналогічного рівня стабільності частоти протягом короткого інтервалу часу (секунди), до приймача GPS необхідно додати генератор безперервних коливань. В стандартах частоти на основі GPS для періодичного коригування внутрішнього рубідієвого генератора використовується відомий механізм фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Спрощено можна сказати, що схема ФАПЧ порівнює положення в часі (фазу) вихідного секундного імпульсу модуля приймача GPS з фазою такого ж секундного імпульсу, отриманого від ділення до 1 Гц частоти рубідієвого генератора. Виходячи з величини різниці фаз імпульсів, виробляється управляючий сигнал для підстроювання частоти рубідієвого генератора, який може зменшити виміряну різницю фаз аж до нуля.

Таким чином, забезпечується сигнал з необхідною як короткочасною (за рахунок рубідієвого генератора), так і довготривалою (за рахунок підстроювання по сигналах GPS) нестабільністю частоти. Стандарти частоти на основі різних керованих генераторів, з деякими функціональними доповненнями, є якраз тим обладнанням, яке необхідне для побудови мереж синхронізації в цифрових мережах електрозв'язку, включаючи мережі GSM, CDMA, передачі даних та ін. У цьому випадку джерела на базі GPS використовуються як генератори синхросигналів високої стабільності. Враховуючи, що сигнал GPS у своєму складі несе інформацію про єдиний час UTC, приймачі GPS можуть з успіхом використовуватися як генератори системи часової синхронізації, тобто пристроїв, в яких акумулюється інформація про точний час.

Функціональна схема стандарту частоти на основі GPS наведена на рисунку 8.2.

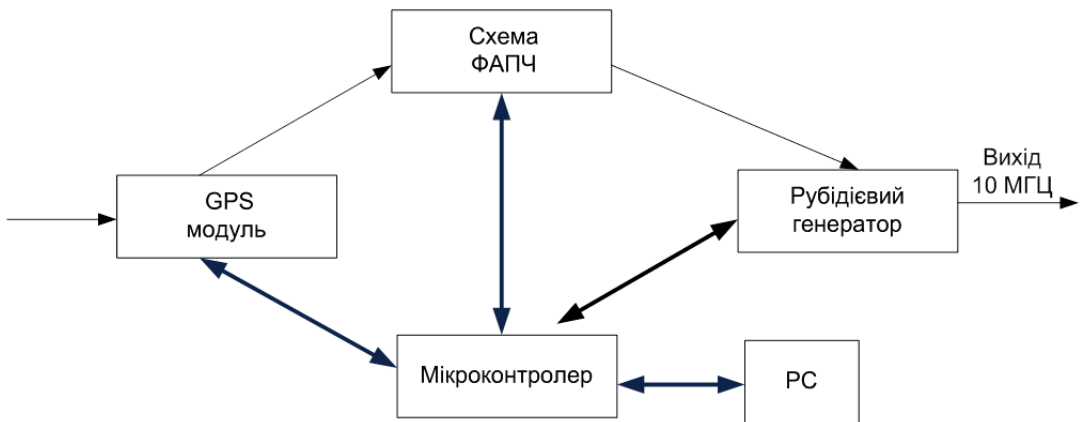


Рисунок 8.2 – Функціональна схема стандарту частоти на основі GPS

## 8.2 Синхронізація цифрових систем зв'язку по сигналах супутникових радіонавігаційних систем

Більшість сучасних цифрових систем радіозв'язку мають кілька систем синхронізації, які розташовуються на приймальній частині радіосистеми. Серед них виділяють:

- системи синхронізації по несучій частоті (ССН);
- системи тактової синхронізації (СТС);
- системи циклової синхронізації (СЦС);
- системи кадрової синхронізації (СКС).

В першу чергу виконується синхронізація по несучій частоті, потім по тактовій частоті, по циклу і по кадру.

Для кожної системи синхронізації виділяють два режими роботи: *режим входження в синхронізацію (режим пошуку)*; *режим стеження*.

У режимі входження в синхронізацію здійснюється пошук і виявлення сигналу, груба оцінка його невідомих параметрів. Після чого система захоплює сигнал і переходить в *режим стеження*, в якому здійснюється точна оцінка невідомих параметрів сигналу, що приймається. Перехід в синхронний режим може здійснюватися за допомогою інформації, яка передається на початку сеансу зв'язку або по самому інформаційному сигналу. Таким чином, ефективність передачі корисних даних знижується через витрати на передачу даних, необхідних тільки для синхронізації і необхідного часу для пошуку сигналу, а також переходу в режим стеження усіх систем синхронізації приймача. У зв'язку з цим не втрачають актуальності питання підвищення ефективності роботи систем синхронізації.

Одним з методів синхронізації передавального і приймального пристроїв є примусова синхронізація з використанням всесвітнього точного часу. В цьому випадку мітки точного часу на кінцях лінії передачі даних формуються, наприклад, за допомогою приймачів глобальних супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS/Galileo. Сучасні приймальні обладнання СРНС здатні синхронізувати часові шкали користувача з

похибкою десятки наносекунд і краще, що дозволяє використовувати їх для синхронізації цифрових систем зв'язку по несучій частоті.

Структурна схема синхронізації передавального і приймального пристроїв по сигналам супутникових навігаційних систем наведена на рисунку 8.3.

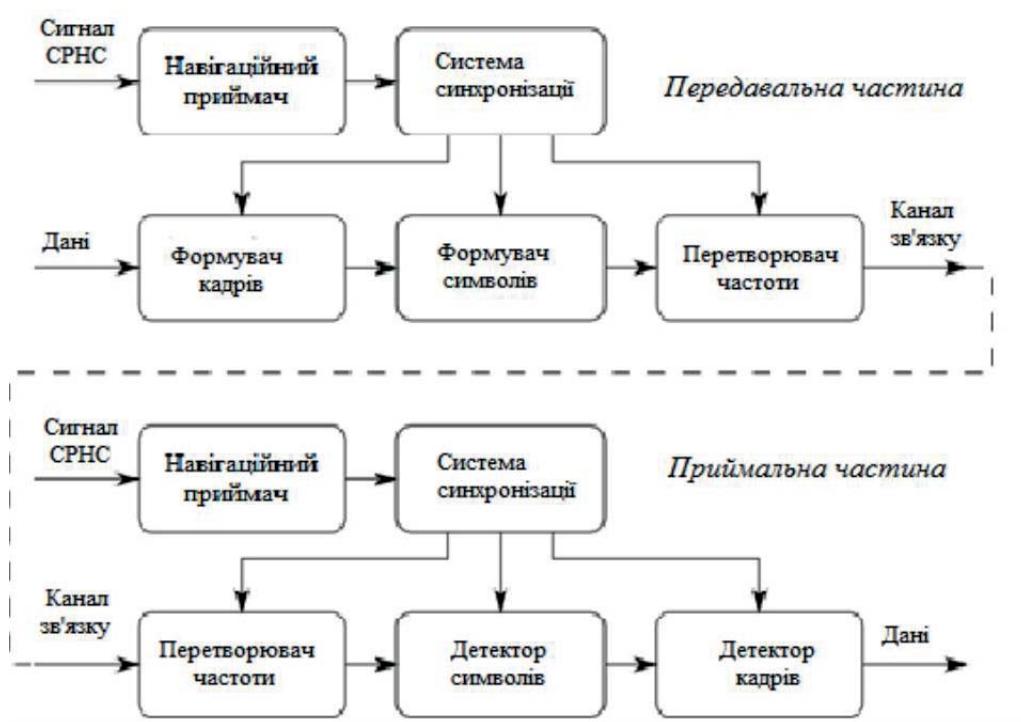


Рисунок 8.3 – Структурна схема синхронізованої системи зв'язку

Навігаційні приймачі передавальної і приймальної частини системи зв'язку служать для визначення координат місця розташування пристроїв і синхронізації шкал часу. Визначення координат місця розташування пристроїв дозволяє визначити відстань між передавачем і приймачем системи зв'язку, розрахувати і врахувати затримку на поширення сигналу (іншим способом визначення цієї затримки є спосіб автоматичного калібрування, коли передавач випромінює в певні моменти часу сигнал-маркер, а приймач робить оцінку затримки цього сигналу за всесвітньою шкалою часу).

Крім того, при зв'язку з рухомими об'єктами, приймач СРНС видає дані про вектор швидкості об'єкту, що дозволяє врахувати в системі синхронізації ефект Доплера.

Відмінними особливостями даного варіанту синхронізації є:

- реалізація синхронізації цифрових систем зв'язку по несучій частоті;
- створення можливості побудови систем зв'язку без будь-яких додаткових петель синхронізації;
- реалізація можливості використання шкали всесвітнього часу для синхронної зміни параметрів програмно-обчислювальних систем зв'язку.

Використання приймачів СРНС для синхронізації шкал часу передавача і приймача дозволяє забезпечити синхронізацію з певною похибкою. У загальному випадку погіршення роботи системи передачі даних, викликане помилками синхронізації, залежить від вибраного виду модуляції.

Таблиця 8.1 – Втрати в каналі зв'язку, викликані відносною помилкою синхронізації часових шкал приймача і передавача

| Швидкість передачі даних, МБод                                                          | Втрати, дБ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3,125                                                                                   | 1          |
| 6,25                                                                                    | 3          |
| 10                                                                                      | 7          |
| Передача з заданою ймовірністю символьної помилки і з більш високою швидкістю неможлива | —          |

Як видно з таблиці 8.1, сучасні радіонавігаційні системи спроможні забезпечити синхронність роботи високошвидкісних цифрових систем передачі даних при задовільному рівні втрат.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. В яких режимах можуть працювати системи синхронізації?
2. Основне завдання супутникових радіонавігаційних систем.
3. Види систем синхронізації.
4. Склад наземного сегменту GPS.
5. На які групи діляться приймачі?
6. Що забезпечує космічний сегмент GPS?

## 9. 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. 9.1). Система надає доступ до широкосмугового Інтернету у будь-якій точці планети. Першою компанія почала обслуговувати Канаду та США у 2020 році.

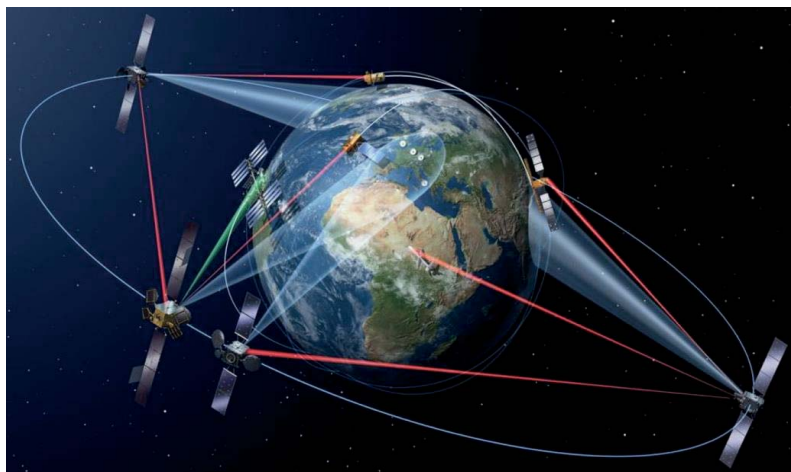


Рисунок 9.1 – Супутникова система Starlink

Назва “Starlink” взята із роману Джона Ґріна “Провина зірок”. Проєкт почався у 2015 році, а перші два супутники було запущено 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 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 частот. 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 навколоземній орбіті. На відміну від інших супутників, які перебувають на значно вищих орбітах, і потрапляють 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.

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.

13 листопада 2021 року ракета-носіє 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 сходитимуть із орбіти і згорять в атмосфері Землі протягом найближчого часу.

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

## **9.1 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 ксеноні, 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 ксенону, а не ксенону здешевлює кожен супутник на ~\$50 тис.

Точне визначення місця перебування всіх супутників допомагатиме визначати навігаційна система відстеження зірок.



Рисунок 9.2 – Супутники Starlink на 72 орбітах по 22 у кожній, всього 1584 одиниці

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 геостаціонарним 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. 9.1 приведено кількісні характеристики сузір'я, а на рис. 9.2 показано їх розміщення.

Таблиця 9.1 – Кількісні характеристики сузір'я

| 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.

### 9.2. Користувачькі 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.

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. 9.2, та характеристики Wi-Fi роутера.

Таблиця 9.2 – Технічні характеристики терміналу Starlink–2

| 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                                                                      |
| Стандарт Wi-Fi              | IEEE 802.11a/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  $+/-50^\circ$ . 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 комплекту 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 штативі з фазованими ґратами, що знаходиться під захисним радіопрозорим ковпаком прямокутної форми. Усередині 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. 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.

При температурі вище 50°C антени відключаються. Необхідно використовувати будь-яку можливу конструкцію для захисту від прямого сонячного проміння.

При розгортанні антени необхідно забезпечити пряму видимість на 100° щодо центру антени (див. рис. 9.3)

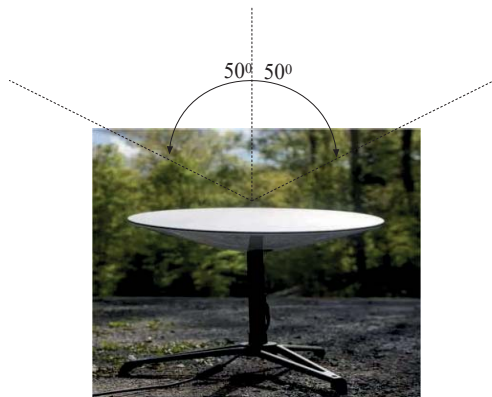


Рисунок 9.3. – Приклад розміщення антени Starlink з метою забезпечення прямої видимості на 100° відносно центру антени

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

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Супутниковий зв'язок залишається галуззю телекомунікацій, яка динамічно розвивається. На заміну супутників, що відпрацювали свій термін, для надання більш широкої номенклатури послуг, для задоволення зростаючого попиту на супутникові канали, на ГСО виводяться нові, більш потужні апарати. Створюються нові супутникові системи зв'язку.

З'являються нові національні оператори. Рядом країн (Азербайджан, Болівія, Іран, Лаос, Нігерія, ОАЕ, Україна) заплановано запуск національних супутників–ретрансляторів.

Кількість супутників на ГСО щорічно зростає приблизно на 3%, при загальному зростанні частотного ресурсу ССЗ.

Рівень прибутків від надання послуг супутниковими каналами постійно зростає у середньому на 13 % у рік, досягнувши значення більш 100 млрд. дол.

Пріоритетним поки що залишається супутникове мовлення. Кількість каналів перевищила 30 тисяч і щорічно зростає, в середньому на 15 %, що вимагає відповідного збільшення частотних ресурсів як стволів супутника, так і земних станцій, призначених для надання мультимедійних послуг.

В Україні працюють п'ять великих приймально–передавальних комплексів супутникового мовлення та кілька значних телепортів фіксованого супутникового зв'язку. Мережі супутникових телекомунікацій переважно використовують діапазон Ku частот.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Срібна І.М., Є.І. Махонін, Власенко Г.М., Кирпач Л.А. Супутникові системи зв'язку і навігації : Навч. посіб. Київ : ДУТ, 2019. 123 с.
2. Кирпач Л.А., Блаженний Н.В. Супутникові інформаційні технології : навч. посіб. Київ : ДУТ, 2021. 85 с.
3. Вишнівський В.В., Василенко В.В., Гніденко М.П., Звенігородський О.С., Зінченко О.В., Іщеряков С.М. Основи надійності та діагностики інформаційних систем : навч. посіб. Київ : ДУТ, 2020. 184 с.
4. Гніденко М.П., Гайдур Г.І., Серих С.О. Перспективні компоненти та засоби інфокомунікаційних технологій : навч. посіб. Київ : ДУТ, 2017. 166 с.
5. Серих С.О. Вибір на налаштування кінцевого обладнання інформаційних систем. Київ : ДУТ, 2020. 93 с
6. Зеленський А. А., Солодовник В. Ф. Системи радіозв'язку. Харків : ХАІ, 2002. 93 с.
7. The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Volume. UN, 2019. URL: <https://doi.org/10.18356/5fce7904-en>.
8. Jing S., Zhan X., Zhu Z. Spacecraft orbit propagator integration with GNSS in a simulated scenario. *Advances in Space Research*. 2017. Vol. 60, no. 5. P. 1062–1079. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.041>
9. Бауер, Ф. Х., Паркер, Дж. Дж., Велч, Б., Ендерле, В.: Розробка надійної, сумісної космічної служби GNSS (SSV) для глобальної спільноти користувачів космосу. У: Матеріали ION ITM 2017, 30 січня–2 лютого, стор. 132–149. Інститут навігації, Монтерей (2018).
10. GPS Positioning Service (SPS) Performance Standard, 5th Edition. Federal Aviation Administration (2020). <https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf>.
11. Konin V., Shyshkov F. Autonomous navigation of service spacecrafts on geostationary orbit using GNSS signals. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2016. Vol. 59, no. 12. P. 562–566. URL: <https://doi.org/10.3103/s0735272716120049>.
12. BDS and GPS side-lobe observation quality analysis and orbit determination with a GEO satellite onboard receiver / W. Li et al. *GPS Solutions*. 2022. Vol. 27, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01358-5>.
13. Kronman, J. D., "Experience Using GPS For Orbit Determination of a Geosynchronous Satellite," *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City, UT, September 2000, pp. 1622-1626.
14. Galileo and Space Service Volume. UNOOSA. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/icg-7/wg/wgb2-2.pdf>
15. Вінклер С. та ін.: Робота приймача GPS на орбіті для космічного корабля GOES–R. У: Матеріали 10-ї Міжнародної конференції ESA з систем наведення, навігації та контролю, Зальцбург, Австрія, стор. 1–19 (2017) .
16. Шишков Ф., Погурельський О., Конін В.: Відмінності вимірювань із роздільним використанням частот L1 і L2 для застосування супутникової

навігації в навколоземному космічному просторі. У: Симпозіум мікрохвильового радіолокатора та дистанційного зондування (MRRS), стор. 67–70. IEEE, Київ (2017).



**Agrar Media Print**

Підписано до друку 21.04.2025 .

Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Друк цифровий. Ум. друк. арк. 5

Віддруковано ФО-П Білецький Р.Г.,

Типографія Аграр Медіа Прінт.

Адреса потужностей: м. Київ, вул. В.Некрасова, 3

e-mail: [info@agrarmedia.com](mailto:info@agrarmedia.com)

тел.: (067) 407 87 23

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців ДК №8116 від 21.06.2024р.

[www.agrarmedia.com](http://www.agrarmedia.com)