

Тема 5

СУПУТНИКОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ

5.1. Конфігурація типової супутникової інформаційної мережі, що базується на геостационарних супутниках-ретрансляторах

Конфігурація типової супутникової інформаційної мережі, що базується на геостационарних супутниках-ретрансляторах (ГСІМ), приведена на рисунку 5.1. В склад ГСІМ зазвичай входять:

Один або декілька ГСР, що утворюють космічний сегмент мережі.

Сукупність земних станцій (ЗС), обладнаних приймально-передавальною апаратурою, що є стосовно мережі джерелами й споживачами інформації.

Одна або декілька центральних земних станцій (ЦЗС), що забезпечують керування процесами інформаційного обміну й функціонування мережі.

Командно-вимірвальна станція (КВС), що забезпечує керування функціонуванням систем ГСР і корекцію його руху по орбіті.

Земні станції обмінюються між собою інформацією через ГСР, який для цього повинен, як мінімум, приймати випромінювані передавальними ЗС надвисокочастотні (НВЧ) сигнали, переносити частотний спектр прийнятих сигналів у другу область частот, підсилювати та перевипромінювати перетворені по частоті сигнали в напрямку приймальних ЗС.

Земні станції виконують також функції вузлів сполучення (шлюзів) між наземними мережами (користувачами) і СІМ. Із цією метою в ЗС здійснюється перетворення форматів і протоколів передачі даних, використовуваних у наземних мережах, у формати й протоколи, що дозволяють ефективно використати зв'язні ресурси супутникових каналів. Залежно від призначення та пропускної здатності основні параметри й конструктивні особливості ЗС сучасних ГСІМ коливаються в широких межах, починаючи від портативних персональних терміналів типу «трубка в руці» з вихідною потужністю в частки ватів і фіксованих малогабаритних станцій з діаметром антен від 0,5 до 2 метрів: вихідною потужністю 1-20 Вт, до досить громіздких конструкцій з більшими антенами діаметром 25-30 метрів і передавачами потужністю до десятків кВт, оформлених у вигляді спеціально побудованих будинків у спеціально обраних місцях.

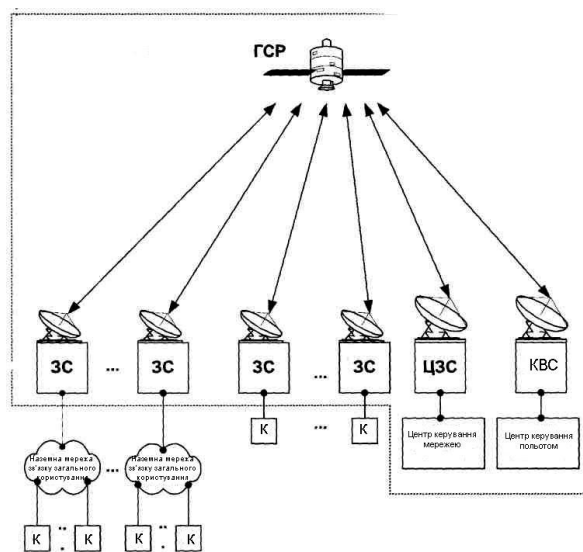


Рисунок 5.1– Типова інформаційна мережа зв'язку на геостационарних супутниках-ретрансляторах:

ЗС – земна станція; ЦЗС – центральна земна станція; КВС – командно-вимірвальна станція; К – користувач

Через ЦЗС центри керування мережею (NOC - Network Operation Center) координують і протоколюють процес функціонування мережі. Зокрема, через ЦЗС здійснюється синхронізація всіх ЗС у складі мережі, забезпечується процедура включення нових ЗС у мережу, розподіляються між ЗС зв'язні ресурси мережі, архівуються дані про використання цих ресурсів кожним користувачем, здійснюється маршрутизація інформаційних потоків по каналах зв'язку мережі, виконується тарифікація. За допомогою контрольно-вимірювальної станції мережі центр керування польотом (FCC - Flight Control Center) одержує та обробляє дані зовнішньотраєкторних вимірів параметрів орбіти ГСР і телеметричну інформацію, яка поступає до нього. На підставі аналізу цих даних формуються відповідні керуючі впливи, що забезпечують штатний режим роботи бортових систем ретранслятора, які у вигляді цифрових команд передаються на ГСР.

Однією з важливих переваг геостаціонарної орбіти є можливість забезпечення значної області обслуговування. Розміри області обслуговування обмежуються наступними умовами:

1. У межах області обслуговування **кут піднесення** (кут місця) антен земних станцій γ (кут між напрямком на точку стояння ГСР і площиною місцевого обр'їу) не повинен бути менше деякого граничного значення γ_{min} , обумовленого призначенням мережі. Малі кути піднесення приводять до можливості затінення ГСР місцевими предметами, що оточують ЗС, до збільшення втрат корисного сигналу в атмосфері й шумів антенної системи ЗС, обумовлених радіошумовим випромінюванням Землі. Для мереж фіксованої супутникової служби, у яких затінення можна виключити шляхом вибору місця установки ЗС, кут γ обмежується знизу величиною $10^\circ-12^\circ$. Для мереж же персональної рухомої служби кут піднесення ГСР над обр'їєм повинен бути не менше 30° .

2. У будь-якій точці області обслуговування при заданих параметрах ЗС на лінії зв'язку повинні забезпечуватися енергетичні співвідношення не гірше заданих.

Область земної поверхні, що задовольняє умові 1, називається **областю видимості ГСР**, а умові 2 - **областю покриття**. Область обслуговування визначається перетинанням областей видимості й покриття.

Визначимо основні геометричні співвідношення в ГСІМ. З урахуванням зв'язку між сферичними й прямокутними координатами (рисунок 5.2) координати земної станції й ГСР будуть відповідно рівні:

$$\begin{aligned}x_c &= r_3 \sin \psi \sin(\varphi - \varphi_p) & x_r &= 0 \\y_c &= r_3 \sin \psi \cos(\varphi - \varphi_p) & y_r &= r_3 + h \\z_c &= r_3 \cos \psi & z_r &= 0\end{aligned}$$

Тоді відстань r (дальність зв'язку) між земною станцією з координатами ψ (широта) та φ (довгота) і ГСР з точкою стояння на довготі φ_r дорівнює:

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2 + (z_c - z_r)^2} = (r_3 + h) \times \\&\times \sqrt{1 + \left(\frac{r_3}{r_3 + h}\right)^2 - 2 \frac{r_3}{r_3 + h} \cos \psi \cos(\varphi - \varphi_p)} \cong \\&\cong 42250 \sqrt{1,023 - 0,3 \cos \psi \cos(\varphi - \varphi_p)} \quad [\text{км}]\end{aligned}\tag{5.1}$$

де $r_3 = 6375 \text{ км}$ – радіус Землі, $p = 35875 \text{ км}$ – висота ГО.

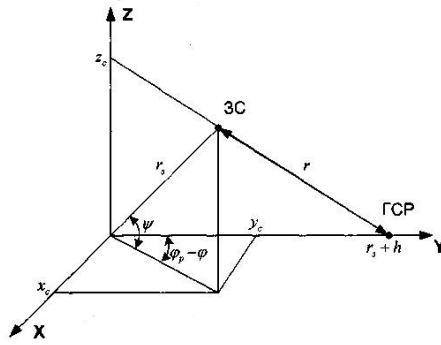


Рисунок 5.2 – Геометрія ГСІМ

– кут піднесення ретранслятора над горизонтом:

$$\gamma = \arcsin\left[\frac{(h+r_3)^2 - r_3^2 - r^2}{2rr_3}\right] \approx \arcsin\left(\frac{1,368 \cdot 10^5}{r} - 7,843 \cdot 10^{-5} r\right) \quad (5.2)$$

– границя області видимості ГСР визначається наступним рівнянням:

$$\cos(\varphi - \varphi_p) \cong \frac{1,023 - \cos^2[\gamma_{\min} + \arcsin(0,15\gamma_{\min}) / \cos^2 \gamma_{\min}]}{0,3 \cos \psi} \quad (5.3)$$

– кут огляду β області видимості з точки стояння ГСР рівний:

$$\beta = 2 \arcsin\left(\frac{r_3}{r_3 + h} \cos \gamma_{\min}\right) \cong 2 \arcsin(0,15 \cos \gamma_{\min}). \quad (5.4)$$

В силу ряду причин величина кута піднесення антени ЗС обмежується значенням $\gamma_{\min} = 10^\circ - 12^\circ$. При, наприклад, $\gamma_{\min} = 11,5^\circ$, отримаємо: $\psi = 70^\circ, \beta = 17^\circ, r = 40500 \text{ км}$. Це відповідає діаметру видимості близько 15600 км та площі 190 млн. км².

На рисунках 5.3 показані області видимості геостационарного СР, побудовані відповідно до 5.3. При збільшенні y_{\min} розміри області видимості скорочуються. Так, наприклад, при збільшенні мінімально припустимого кута піднесення від $11,5^\circ$ до 30° діаметр області видимості зменшується до 11300 км, а її площа скорочується майже у два рази. Можливість обслуговування єдином ГСР величезних територій є основною перевагою ГСІМ. У той же час проблематичність обслуговування високоширотних областей

є їх недоліком.

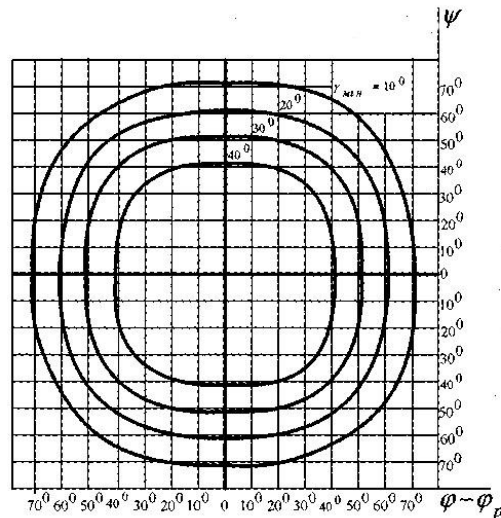


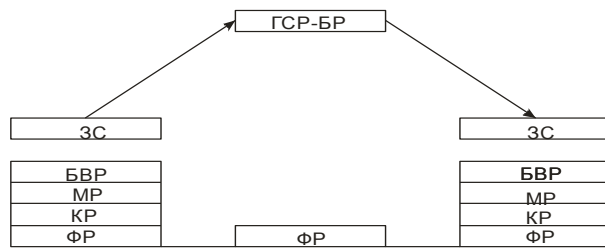
Рисунок 5.3 – Области видимості ГСР

5.2. Організація роботи через ГСР

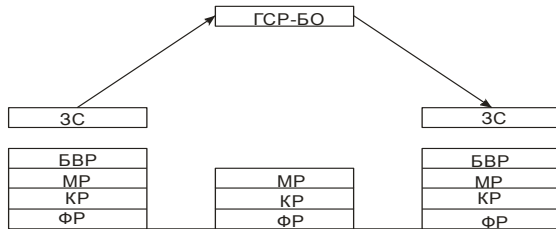
У переважній більшості існуючих ГСІМ використовуються ГСР з безпосередньою ретрансляцією сигналів. Супутник приймає сигнали радіоканалу ЗС-ГСР (радіолінія «вверх»), здійснює зсув (перенесення) спектру сигналу частот, лінійну фільтрацію і перевипромінює сигнал у радіолінію ГСР-ЗС (радіолінія «вниз»). Відповідно з еталонною моделлю з'єднання відкритих систем ЗВС (OSI- Open System Interconnection) ГСР з безпосередньою ретрансляцією виконує в мережі лише функції нижчого фізичного рівня, а підтримка більш високих рівнів покладена на ЗС (5.4). Бортовий ретрансляційний комплекс (БРТК) супутників з безпосередньою ретрансляцією можуть використовувати одноразове або подвійне перетворення частоти. Спрощена структурна схема БРТК з однократним перетворенням частоти показана на рисунку (рисунок 5.5, а). Після попереднього підсилення та фільтрації спектр сигналів лінії «вверх» зміщується шляхом гетеродинування в досить далеку відстаючу область більш низьких частот з центральною частотою f_2 . Відстань центральних частот радіоліній «вниз» і «вверх» повинна бути не менше смуги ретрансльованих частот. Далі сигнал посилюється до рівня необхідного для розкачки крайнього підсилювача потужності (ПП) і випромінюється в напрямку ЗС. Для підтримки необхідного рівня сигналу на вході ПП зазвичай використовується автоматичне регулювання підсилення по командній радіолінії. Стабільність перетворення спектру зазвичай забезпечується синхронізацією високочастотного гетеродину від високостабільного еталону чистоти за допомогою вузла фазового автопідстроювання частоти (ФАП).

При подвійному перетворенні частоти (рисунок 5.5, б) спектр вхідного сигналу зміщується в область проміжних частот (ПЧ), на яких здійснюється основне підсилення і фільтрація. Потім спектр переноситься у область частот радіоканалу "вниз". Використання досить низьких ПЧ дозволяє підвищити стабільність підсилення і покращити придушення позасмугового шуму у порівнянні з однократним перетворенням. Найбільшою мірою ця перевага подвійного перетворення проявляється при передачі вузькосмугових сигналів.

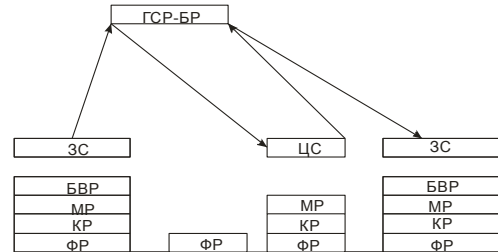
На практиці смуга пропускання ретранслятора, яка може становити сотні мегагерц, розбивається на ряд більш вузьких смуг, кожна з яких перетворюється, підсилюється за допомогою окремих прийомо-передавачів. Спільними для ПП є антени, широкосмугові попередні підсилювачі і генератори еталонних частот.



а) безпосередня ретрансляція



б) бортова обробка



в) двострибкова

схема

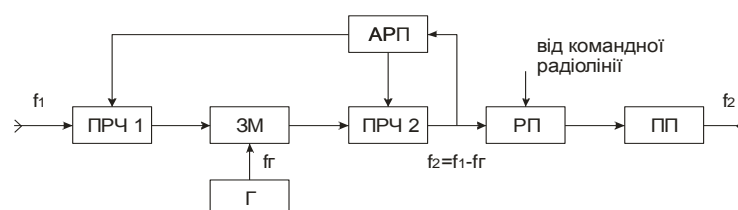
Рисунок 5.4 – Організація роботи через ГСР:
 ЗС- земна станція; ЦС - центральна станція; ФР - фізичний рівень; КР - каналний рівень; СР - системний рівень; БВР - більш високий рівень

Багатостволовий БРТК є наслідком технологічної складності створення надширокопasmових підсилювачів, які мають сприятливі АЧХ та ФЧХ.

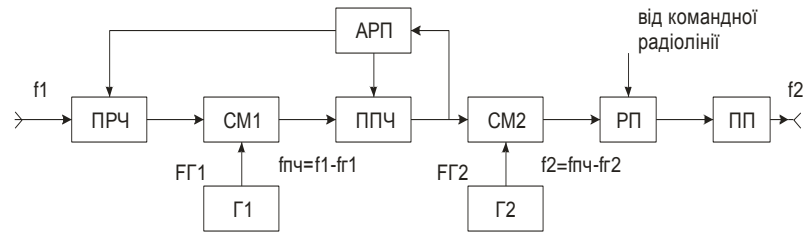
Типові значення смуг пропускання стовбурів становлять 24, 36, 72 МГц і в міру вдосконалення технології мають тенденцію до розширення. Традиційною схемою побудови БРТК з безпосередньою ретрансляцією є багатостволова схема з числом стволів до декількох десятків і подвійним перетворенням частоти в кожному стволі.

Альтернативою безпосередній ретрансляції є використання ретрансляторів з обробкою сигналів. Спрощена структурна схема БРТК ретрансляторів з обробкою приведена на рисунку 5.5, б. З виходу лінійної частини приймача (перетворення частоти, підсилення, лінійна фільтрація) сигнал ПЧ надходить до демодулятора, де переводиться в область відеочастот, декодується і обробляється в процесорі відеосигналів. Оброблені відеосигнали кодується, модулюються, підсилюються і випромінюються. Переваги та недоліки таких схем були описані у лекції 4.

Спробою компромісу, що поєднує переваги безпосередньої ретрансляції і бортової обробки є двострибкова схема передачі, що передбачає наявність центральної станції, яка здійснює демодуляцію сигналів, вилучає необхідну маршрутну інформацію і здійснює цілеспрямовану комутацію інформаційних потоків (рисунок 5.5, в). Однак у цьому випадку наявність двох стрибків сигналів при передачі примножує затримку поширення сигналів, а необхідність двічі перевипромінювати одні і ті ж сигнали призводить до додаткових витрат зв'язкових ресурсів ГСР: у два рази зростає смуга, яка потребує пропускання, і зростають вимоги до його енергозабезпеченості.



а) безпосередня ретрансляція з одним перетворенням частоти



б) з подвійним перетворенням частоти



в) ретрансляція з бортовою обробкою

ПРЧ – підсилювач радіочастоти, ЗМ – змішувач, Г – гетеродин, ПП – підсилювач потужності, АРП – автоматичне регулювання підсилення, РП – регулювання підсилення, ЛЧП – лінійна частина приймача, ДМ – демодулятор, ДК – декодер, ПВС – процесор відеосигналів, ПК – пристрій кодування, М – модулятор

Рисунок 5.5– Спрощені структурні схеми БРТК

Однією із найважливіших ознак мережі зв'язку є топологія мережі, що характеризує схему об'єднання вузлів і каналів зв'язку у єдину структуру. На відміну від наземних провідних і кабельних мереж в яких канал зв'язку між парою вузлів представляє собою окрему фізичну лінію, яка сполучає тільки цю пару, в ГСІМ на базі СР з безпосередньою ретрансляцією фізично присутній в принципі доступний для будь-якої ЗС загальний частотний ресурс, який утворює загальний моноканал (рисунок 5.6). На основі моноканалу можуть бути організовані різні віртуальні (логічні) канали зв'язку, що дозволяють реалізувати різноманітні логічні топології ЗВС (рисунок 5.7).

5.3. Мережеві топології, що реалізуються у ГСІМ

Розглянемо коротко основні властивості і особливості мережевих топологій, які можуть бути організовані у ГСІМ:

1) **повнозв'язна топологія** (рисунок 5.7, а) передбачає наявність для будь-якої пари вузлів окремого (виділеного) каналу

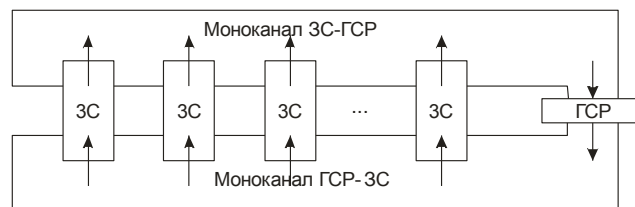


Рисунок 5.6 – Фізична топологія супутникової мережі зв'язку на базі ГСР з безпосередньою ретрансляцією

зв'язку, що з'єднує ці вузли безпосередньо. Для організації повнозв'язної мережі, яка містить n вузлів, потрібно $n(n-1)/2$ каналів зв'язку.

У ССЗ, що базується на ГСР з безпосередньою ретрансляцією повнозв'язність топології є природним результатом широкомовності супутників радіоканалів. На ділянці

ГСП-ЗС усі наземні станції мережі можуть прослуховувати передачу ретранслятора. На ділянці ЗС-ГСП виникає проблема організації безконфліктного доступу багатьох просторово рознесених вузлів до загального моноканалу. Ця проблема вирішується шляхом виділення в загальному супутниковому фізичному каналі певної кількості логічних каналів, які відрізняються один від одного обумовленими раніше ознаками, та використанням в каналах множинного доступу (рисунок 5.8). Ці протоколи бувають розподіленими, реалізованими спільними усіма абонентськими вузлами мережі, або централізованими, підтримуваними одним спеціальним вузлом мережі – контролером каналу зв'язку.

Властивості багатозв'язної ССЗ відрізняються від властивостей наземних мереж з аналогічною топологією. Наявність віртуальних каналів зв'язку організованих на основі загальнозв'язкового ресурсу і застосування протоколів множинного доступу дозволяють гнучко перерозподіляти пропускну здатність між каналами мережі відповідно до поточних потреб, аж до відключення тимчасово непотрібних каналів. Це забезпечує більш ефективне використання дорогих ресурсів супутникової мережі у порівнянні з наземною. У той же час, повнозв'язність ССЗ не забезпечує збільшення надійності мережі у порівнянні з іншими топологіями і скритність передачі. ГСП з безпосередньою ретрансляцією не є мережевим вузлом, а виконує лише функції послідовної ланки в супутниковому моноканалі.

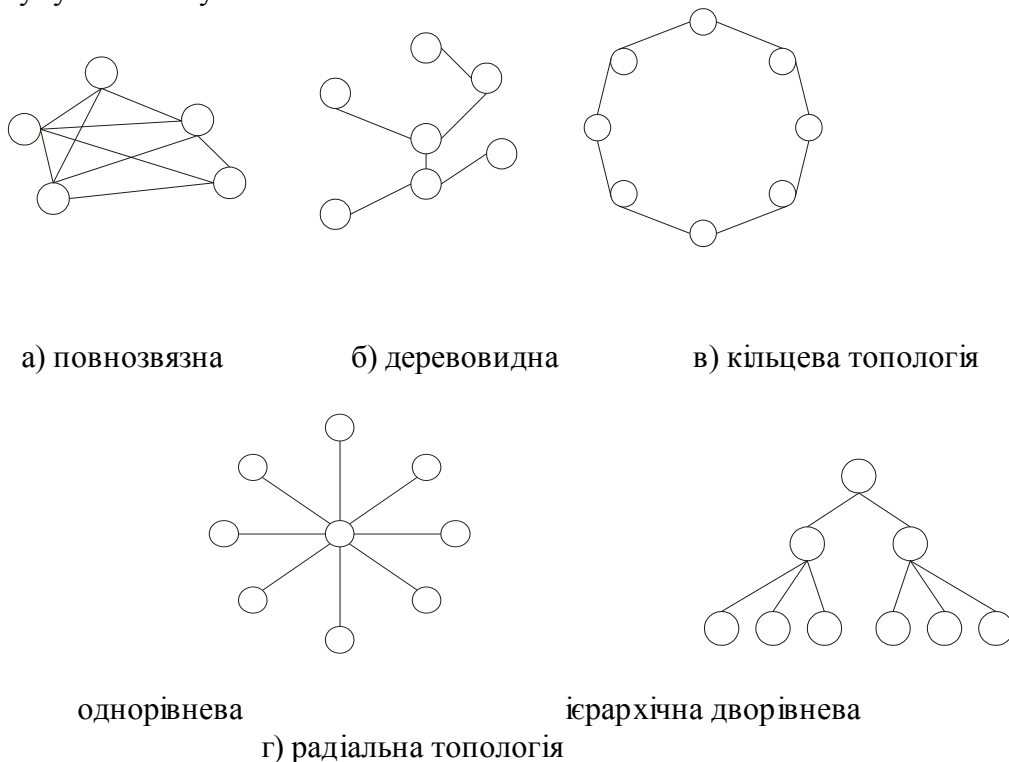


Рисунок 5.7 – Мережеві топології, які реалізуються в ССЗ

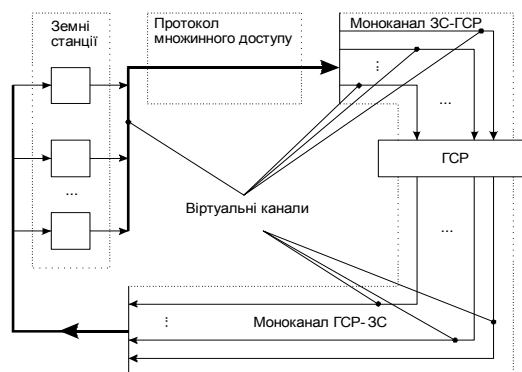


Рисунок 5.8 – Організація повнозв'язної топології в ССЗ, що використовують ГСР з безпосередньою ретрансляцією

Відмова ГСР призводить до одночасного розриву усіх фізичних каналів і повної деградації супутникової мережі незалежно від її логічної топології. Якщо не прийняті спеціальні заходи, скритність передачі в ССЗ відсутня, оскільки передача ГСР може бути прослухана будь-якою ЗС, що знаходиться в межах області обслуговування.

2) **Деревовидна топологія** (рисунок 5.7, б) характеризується тим, що між будь-якою парою вузлів мережі з такою топологією існує лише один шлях. Кількість каналів зв'язку в n -вузловій деревоподібній мережі мінімальне і дорівнює $(n-1)$. Надійність мережі низька, оскільки відмова навіть одного з каналів може привести до розчленування мережі на дві ізольовані підмережі. Деревовидну топологію також як і **кільцеву** (рисунок 5.7, в) легко можна реалізувати в ССЗ, але їх практичне застосування не має сенсу, оскільки вони не мають жодних переваг порівняно з повнозв'язною, а лише призводять до додаткових недоліків, пов'язаних з необхідністю здійснювати багатострибкову передачу – зростання затримок і зниження ефективності використання ресурсів ГСР.

3) **Радіальна (зіркоподібна) топологія** (рисунок 5.7, г) характеризується тим, що кожен периферійний вузол з'єднаний безпосередньо тільки з центральним вузлом, а зв'язок між периферійними вузлами можливий тільки через центральну точку. Радіальна топологія є окремим випадком деревоподібної, але на відміну від загального випадку широко використовується в ССЗ. Оскільки периферійні вузли функціонують не залежно один від одного, мережа не критична до їх відмов. Відмова ж центрального вузла призводить до деградації всієї мережі, тому необхідно приймати спеціальні заходи для забезпечення високої надійності вузла шляхом резервування його апаратно-програмних засобів на різних рівнях. Радіальна мережа може бути розширена або шляхом підключення додаткових периферійних вузлів до центрального, або ієрархічним багаторівневим способом, шляхом підключення додаткових вузлів до периферійних вузлів більш високого рівня. При цьому вузли проміжного рівня контролюють вузли більш низького рівня, підкоряючись в той же час вузлу вищого рівня. Ієрархічна структура в багатьох випадках виявляється кращою, оскільки найбільш повно відповідає процесу ієрархічного адміністративного управління при побудові, наприклад, корпоративних ССЗ для великих територіально - розподілених промислових та фінансових компаній, державних структур і т.п.

Таким чином, для ССЗ, що базується на геостаціонарних ретрансляторах з безпосередньою ретрансляцією, природною в силу специфіки супутникових каналів зв'язку є повнозв'язна топологія. Радіальна топологія при однострибковій схемі передачі може бути забезпечена тільки для мереж з однонаправленою передачею інформацією (мереж збору або розподілу), наприклад, для супутникових мереж телевізійного та радіомовлення. У разі необхідності забезпечення при безпосередній ретрансляції радіальної топології використовують двострибкову схему. Такий підхід використовується, наприклад, при побудові великої частини корпоративних мереж VSAT. Для ССЗ, що використовують ретранслятори з бортовою обробкою і комутацією сигналів, що є центральними мережевими вузлами, природна і єдино можлива радіальна мережева топологія.