

Тема 8

НЕГЕОСТАЦІОНАРНІ СУПУТНИКОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ

На теперішній час наряду з ГСІМ для побудови інформаційних супутникових систем використовують мережі зв'язку на базі негеостаціонарних ретрансляторів. Основними особливостями негеостаціонарних супутникових інформаційних мереж (НСІМ) по зрівнянню з ГСІМ являються:

- менша висота орбіт КА (від 700-1500 км – у низькоорбітальних мереж (LEO), до 10000-20000 км – у середньорбітальних, і, як слідство, суттєво менша затримка розповсюдження сигналів;
- невеликі енерго- і масогабаритні характеристики КА. Наприклад, вага низькоорбітальних КА не перевищує 250-750 кг;
- висока швидкість зміни топології мережі та мала тривалість часу радіовидимості (наприклад, у LEO середня тривалість часу радіовидимості в незмінній топології каналів зв'язку складає тільки 6-7 хвилин);
- високі доплеровські зсуви частот (біля +/- 40 кГц у L- діапазоні);
- використання більш високих, чим для ГСІМ, кутів піднесення антен терміналів, наприклад 2040° , що забезпечує надійність зв'язку біля 99,9%, і т.п.

Інші відмінності LEO НСІМ від ГСІМ приведені у таблиці 8.1. (у таблиці 8.1. LEO розділені на два класи: невеликі (вагою до 125 кг) і великі (вагою до 500-700 кг).

Таблиця 8.1– Основні кількісні характеристики НСІМ та ГСІМ

Характеристика	Невеликі LEO	Великі LEO	Геостаціонарні
1	2	3	4
Параметри орбіти	Біля 2000 км	Від 750 до 1300 км	36000 км
Діапазон частот	Біля 500 МГц; 1,6 та 2,5 ГГц	1,6 і 2,5 ГГц	19 і 29 ГГц
Вага, кг	40-125	350-500	до 1200
Число супутників	2-48	12-66; Teledesic-288	
Складність системи			В цілому висока
Ціна побудови, запуску і використання	Низька	Висока	Висока
	Низька		

Продовження таблиці 8.1

1	2	3	4
Технічні характеристики системи			
Необхідна потужність Термінал	Низька Ручний	Низька Ручний	Висока Стационар-ний
Тип антени	Слабонапрявлена (штирвова)	Слабонапрявлена (штирвова)	Напрявлені дзеркальні антени
Обмеження по переміщенню	Середні	Високі	Дуже високі
Умови поширення радіохвиль			
Чутливість до затухання у дощі	Низька	Середня	Висока
Степінь проникнення через листя	Висока	Низька	Низька
Степінь проникнення у будівлі	Низька	Низька	Дуже низька
	Середня	Висока	Висока
	Високі	Середні	Середні

Інтерференція із-за багато-променевості Шумові характеристики			
Доступний сервіс			
Визначення місцеположення	Так	Так	Так
Фіксований термінал	Так	Так	Так
Мобільний термінал	Так	Так	Так
Передача даних	50-500	Більше 1000	Більше 2000
Вартість терміналу, \$			

Негеостаціонарними угрупованнями супутників-ретрансляторів являються СР, які розміщуються на кругових орбітах висотою менше геостаціонарної, а також на еліптичних орбітах.

Однією з ключових проблем при розробці НСІМ являється організація міжзонового інформаційного обміну, необхідного для підтримання зв'язку між користувачами, які знаходяться в різних зонах обслуговування. Для цього необхідна міжзонава мережа зв'язку (ММЗ). Незалежно від способу організації каналів зв'язку між зонами до ММЗ пред'являються наступні основні вимоги:

- топологія мережі повинна бути розгалуженою настільки, щоб забезпечувати прийнято малі затримки при передачі;
- топологія мережі повинна бути максимально стійкою у часі, інакше виникає необхідність реконфігурації каналів зв'язку ММЗ, що суттєво погіршує якість зв'язку.

Розглянемо основні переваги і недоліки можливих варіантів організації міжзонової мережі зв'язку.

1 варіант. З використанням наземних (кабельних, волоконно-оптичних, радіорелейних) каналів зв'язку (рисунк 8.1). В цьому випадку у кожній зоні обслуговування розміщується наземна базова станція (БС), з'єднана з обслуговуванням супутником (який контролює зону обслуговування цієї БС) внутрішньозоною фідерною лінією. Основною перевагою цього варіанта побудови мережі являється можливість використання простих і відносно дешевих супутників з безпосередньою ретрансляцією. Для організації фідерної лінії БС і СР повинні бути обладнані слідкуючими антенними системами з вузькими скануючими променями. Просторовий розподіл вузьконапрямлених фідерних ліній дозволяє використовувати в них однакові діапазони частот. Інформаційний обмін між користувачами, наприклад, при комутації повідомлень здійснюється наступним чином. Відправник передає по абонентській лінії повідомлення на ретранслятор, що обслуговує його зону і який по фідерній лінії пересилає його без обробки в БС – зони, БС демодулює та декодує повідомлення, виявляє адресу одержувача та приналежність його до однієї із зон обслуговування мережі. Якщо одержувач знаходиться в межах зони обслуговування даної БС, то БС по фідерній лінії його тому ж ретранслятору, який і доводить його до одержувача. В протилежному випадку БС визначає другу станцію, яка контролює зону обслуговування одержувача, обирає оптимальний маршрут та пересилає до неї повідомлення по наземній мережі. Аналогічні процеси відбуваються при комутації пакетів і каналів з тією різницею, що при комутації каналів подібним чином оброблюються запити

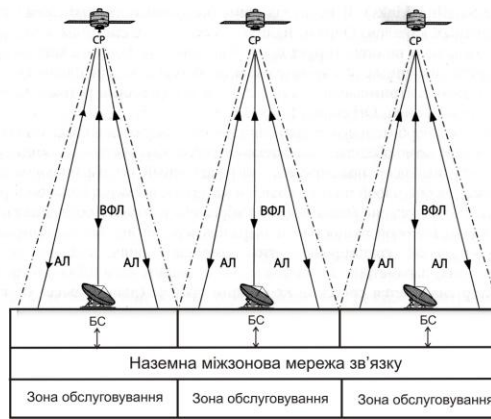


Рисунок 8.1– Організація міжзонового зв'язку за допомогою наземних каналів:
 СР – супутник-ретранслятор; БС– базова станція; АЛ – абонентська лінія; ВФЛ – внутрішньозонова фідерна лінія

(виклики) на встановлення каналу зв'язку. Топологія ММЗ в даному випадку не залежить від часу, тому встановленні з'єднання "розкриваються" тільки при реконфігурації абонентських і фідерних ліній. Складність та вартість космічного сегмента мережі серед можливих варіантів мінімальні, а складність наземного сегмента – максимальна.

2 варіант. Використання для зв'язку між базовими станціями ретрансляторів угруповань (рисунок 8.2).

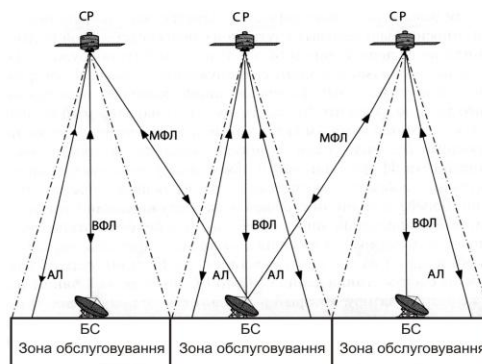


Рисунок 8.2 – Організація міжзонового зв'язку з використанням ретрансляторів угруповань та базових станцій:

СР – супутник- ретранслятор; БС – базова станція; АЛ – абонентські лінії; ВФЛ – внутрішньозонова фідерна лінія; МФЛ – міжзонові фідерні лінії

У цьому випадку можливе використання супутників з безпосередньою ретрансляцією, але оскільки вони передають не тільки внутрішній, а і міжзоновий трафік, їх пропускна спроможність має бути вище. Додатково ретранслятор обладнується для замикання міжзонових ліній трьома – чотирма приймальними вузькими променями, які сканують. БС також ускладнюються, оскільки вони підтримують фідерну лінію у 3-4 міжзонових ліній (БС повинні бути обладнані 4-5 вузькими променями, які сканують). Наземні канали виключаються. Маршрутизація інформаційних потоків здійснюється в БС. Канал зв'язку між парою користувачів, що розташовані у різних зонах обслуговування, утворюється колом абонентських, внутрішньозонових, та міжзонових фідерних ліній. В цьому випадку, який розглядається необхідна часта реконфігурація всіх ліній, тому ймовірність "розриву" встановленого з'єднання, якщо не прийняті спеціальні міри, достатньо велика (особливо для довгих каналів).

3 варіант. Використання для зв'язку між зонами обслуговування міжспутникових каналів (ліній) зв'язку (рисунок 8.3). В цьому випадку необхідність у використанні БС відпадає, оскільки всі їх функції покладаються на ретранслятори.

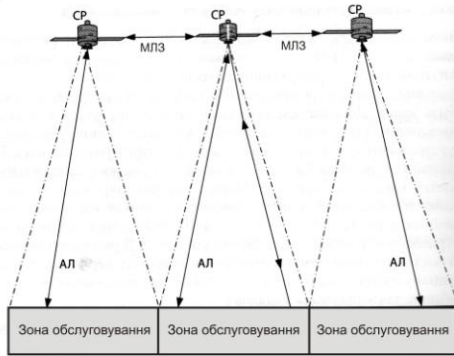


Рисунок 8.3 – Організація міжзонового зв'язку за допомогою міжспутникових ліній зв'язку:

CP – супутник – ретранслятор; БС – базова станція; AL – абонентська лінія; MLZ – міжспутникова лінія зв'язку

Очевидно, що для цього необхідні ретранслятори з повною обробкою (демодуляція-модуляція, комутація на відеочастоті). Зв'язок між зонами обслуговування забезпечується трьома – чотирма міжспутниковими каналами на кожний ретранслятор. Динаміка взаємного переміщення ретрансляторів угруповання невелика, і реконфігурація міжспутникових каналів потребується тільки близько точки пересікання орбітальних площин. Тому ймовірність "розриву" встановленого з'єднання суттєво нижче, чим в попередньому випадку (варіант 2).

Оцінимо вплив висоти орбіти CP на вимоги до енергетичних характеристик абонентських терміналів та ретрансляторів. Розглянемо рисунок 8.4. Зафіксуємо кутовий розмір зони обслуговування α – кут огляду із центру Землі. Нехай ретранслятор нерухомий відносно зони обслуговування і його підсупутникова точка співпадає з центром зони. Тоді, з використанням відношень елементарної тригонометрії, легко можна отримати:

– кут огляду обслуговування зі супутника:

$$\beta = \left[180^\circ - \frac{\alpha}{2} - 2 \arctg \left(\frac{h}{(2r_s + h) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{4} \right)} \right) \right], \quad (8.1)$$

де h – висота орбіти ретранслятора,

– максимальна дальність зв'язку:

$$r = r_s \frac{\sin(\alpha/2)}{\sin(\beta/2)}. \quad (8.2)$$

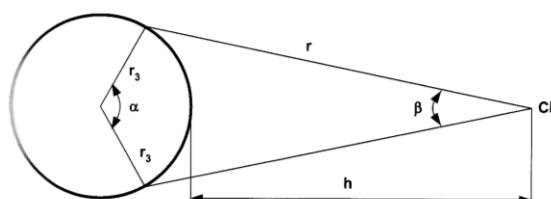


Рисунок 8.4 – Геометричне співвідношення при оцінці енергетичних втрат

Розглянемо дві орбіти з висотами h_1 та h_2 ($h_2 > h_1$) з відповідними параметрами r_1 , β_1 та r_2, β_2 . Відносний енергетичний програш більш високої орбіти за рахунок збільшення дальності зв'язку складе $(r_2/r_1)^2$. З другої сторони при збільшенні висоти орбіти зменшується кут огляду зони обслуговування зі супутника, що призведе до необхідності використання антен з кращими характеристиками напрямленості. Оскільки ефективна площа приймальних антен і коефіцієнт підсилення передавальних зворотно пропорційні квадрату ширини діаграми напрямленості, то величина відносного виграшу дорівнює $(\beta_1/\beta_2)^2$, результуючий програш складе

$$\left(\frac{r_2\beta_2}{r_1\beta_1}\right)^2 \quad (8.3)$$

Результати розрахунків за приведеними співвідношеннями для двох значень кутів розміру зони обслуговування $\alpha = 20^\circ$ та $\alpha = 4^\circ$ приведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Порівняльні характеристики різноманітних ОГ

Тип орбіти		Низька			Середня			ГЕО
Висота орбіти, км		700	1100	1500	5000	10000	15000	35875
Кут огляду зони обслуговування, град	$\alpha = 20^\circ$	109	85,6	69,5	24,5	12,5	8,4	3,5
	$\alpha = 4^\circ$	35	22,8	16,8	5,1	2,55	1,7	0,71
Максимальна дальність зв'язку, км	$\alpha = 20^\circ$	1360	1630	1943	5220	10173	15122	36267
	$\alpha = 4^\circ$	740,2	1126	1524	5003	10003,5	15005	35925
Енергетичний програш, разів/дБ	$\alpha = 20^\circ$	1/0	0,886/ -0,53	0,83/ -0,81	0,744/ -1,28	0,736/ / -1,33	0,734/ -1,34	0,733/ -1,35
	$\alpha = 4^\circ$	1/0	0,982/ -0,08	0,977/ -0,1	0,97/ -0,13	0,969/ / -0,14	0,969/ -0,14	0,969/ -0,14

Приведені в таблиці значення енергетичного програшу абонентських ліній розраховані відносно орбіти мінімальної висоти і є виявляються менше одиниці. Збільшення висоти орбіти не тільки супроводжується енергетичним програшем, але забезпечує незначний виграш, величина якого зростає по мірі збільшення висоти орбіти і розмірів зони обслуговування. Збільшення дальності зв'язку компенсується необхідністю використання більш складних та громіздких бортових антен з високим коефіцієнтом підсилення.

При достатньо малих кутових розмірах зон обслуговування, використовуючи розклад:

$$\sin(x) = \operatorname{tg}(x) \approx x \quad \text{при } x \leq 1$$

$$\operatorname{arctg}(x) \cong \frac{\pi}{2} - \frac{1}{x} \quad \text{при } x > 1,$$

отримаємо:

$$\beta \approx \frac{\alpha}{h} r_3, \quad r \approx h \quad h\beta \approx \alpha r_3 \quad \beta \approx \alpha \frac{r_3}{h} \quad (8.4)$$

Вище було розглянуто енергетику абонентських ліній при нерухомому ретрансляторі відносно зони обслуговування. На практиці не геостаціонарні супутники послідовно пересікають ці зони, проводячи з їх абонентами сеанси зв'язку. При використанні бортових антен с фіксованою діаграмою напрямленості (ДН) формується так називаний "ковзний" промінь і для покриття зони обслуговування в течії сеансу зв'язку ширину ДН приходится збільшувати приблизно у 2 рази (рисунок 8.5, а), що призведе до енергетичного програшу по зрівнянню з ГСР на – 6 дБ. Виключити цей програш дозволяє використання бортових антен, які сканують. В течії сеансу зв'язку прийнятно – передавальний промінь антени відслідковує переміщення супутника відносно зони обслуговування таким чином, щоб промінь був постійно націлений у центр зони (рисунок 8.5, б). При зміні зон обслуговування промінь ретранслятора скачкоподібно перенацілюється в центр наступної зони, яка обслуговується. Таке рішення називають квазістатичним покриттям зон обслуговування. При цьому необхідно використання бортових антен, які сканують на основі фазованих антенних ґраток, що призведе до помітного ускладнення і здороження антенних систем ретранслятора.

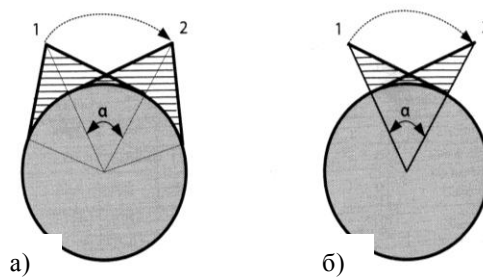


Рисунок 8.5 – Покриття зон обслуговування негеостаціонарними ретрансляторами: а) покриття "ковзним" промінем, б) квазістатичне покриття; 1 та 2 – точки входу/виходу у/з зони обслуговування, відповідно

Кутовий розмір зони обслуговування через параметри абонентських ліній зв'язку:

$$\alpha \approx \frac{4650}{f} \sqrt{\frac{P_{\Pi} G_{\Pi}}{h_{\Pi}^2 L T C}}, \quad (8.5)$$

де f , ГГц – робоча частота; P_{Π} , Вт і G_{Π} – відповідно потужність передавача і коефіцієнт підсилення передавальної антени користувальницьких терміналів; h_{Π}^2 – граничне відношення сигнал/ шум; L – результуючі втрати корисного сигналу на трасі розповсюдження; T , $^{\circ}\text{K}$ – шумова температура приймальної системи ретранслятора; C (кбіт/с) – пропускна здатність

Оцінимо затримки розповсюдження сигналів. Розглянемо рисунок 8.6. Безпосередньо із геометричної побудови слідує, що дальність зв'язку дорівнює:

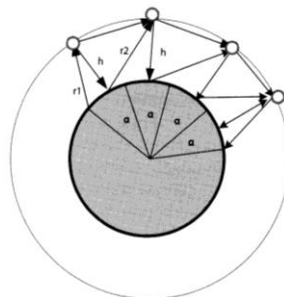


Рисунок 8.6 – До визначення затримок розповсюдження

- при використанні супутників з безпосередньою ретрансляцією і міжзонового зв'язку через базові станції:

$$r = 2r_1 + (n-1)r_2 + (n+1)h,$$

- при використанні для міжзонового зв'язку міжзонових ліній зв'язку (МЛС):

$$r = 2r_1 + (n-1)r_3,$$

де n – відстань між зонами обслуговування абонентських терміналів, які встановили з'єднання і що виражається у числі зон.

Відстань r_1, r_2, r_3 (довжина міжсупутникового каналу) визначається наступними відношеннями:

$$r_1 = \frac{r_3 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos\left\{\frac{\alpha}{4} + \arctg\left[\frac{h}{(2r_3 + h)\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{4}\right)}\right]\right\}}, \quad (8.6)$$

$$r_2 = (r_3 + h) \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\gamma)}$$

$$r_3 = (r_3 + h) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

де $\alpha = 90^\circ - \gamma - \arcsin\left[\frac{r_3}{r_3 + h} \cos(\gamma)\right]$ – кутовий розмір зони обслуговування; γ – мінімально допустимий кут піднесення ретранслятора над зоною обслуговування.

Результати розрахунків максимальної дальності зв'язку і затримки для $\gamma = 10^\circ$ та типових значень висот орбіт приведені у таблиці 8.2.

Дані таблиці дозволяють заключити наступне:

- використання середніх орбіт при міжзоновому зв'язку через БС забезпечує затримки (максимальні), які співпадають з затримками у глобальних СІМ через ГСР (відповідно, 382 і 517 мс);
- середньоорбітальні угруповання, які використовують міжзонові лінії зв'язку, використовують затримку, які співпадають з затримкою в регіональних СІМ через ГСР (232 і 270 мс, відповідно);
- використання низьких орбіт дозволяє зменшити максимальну затримку розповсюдження у 4-6 разів по зрівнянню з геостаціонарною орбітою.

Таблиця 8.2- Дальність зв'язку і затримки поширення сигналу

Висота орбіти h, км		0	700	1500	10,000	35,875
Кутовий розмір зони обслуговування	α , град	-	17,4	27	57,5	70
	r_1	-	1239	2248	11,212	41,000
	r_2	-	2155	3648	14018	-
	r_{\min}	-	2147	3695	15743	73184
Міжзоновий зв'язок через БС і ретранслятори угруповань	r_{\min}	0	3878	7496	42424	-
	r_{\max}	20037	32428	38384	114,478	-
	r_{\min}	0	13	25	141	-
	r_{\max}	67	108	128	382	-
Міжзоновий зв'язок через МЛС	r_{\min}	-	2478	4496	22424	82,000
	r_{\max}	-	23,948	26,667	69653	155,184
	r_{\min}	-	8,3	15	78	270

	Γ_{max}	-	80	89	232	517
--	----------------	---	----	----	-----	-----

Таким чином, з точки зору затримки передачі краще низькоорбітальні угруповання (особливо для глобальної телефонії), які спроможні забезпечити найбільшу якість інтерактивного зв'язку. Тим не менш середньоорбітальні і геостаціонарні угруповання все ж вкладаються у рамки вимог, що пред'являються, тому критерій затримки не дозволяє виявити однозначно найбільш кращий варіант побудови мережі.