

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного Інтернет-доступу у віддалених районах»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

[підпис] Кукленко М.С.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
[підпис] Барась С.Т.

«7» грудня 2023 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС
[підпис] Осадчук Я.О.

«7» грудня 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

[підпис] д.т.н., проф. Кичак В.М.

«13» 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17- Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)

Спеціальність - 172 - Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“19” 09 2023 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кукленку Миколі Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного Інтернет-доступу у віддалених районах

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18.09.2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

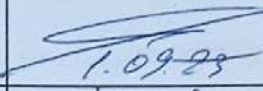
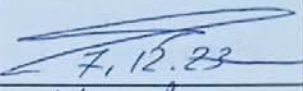
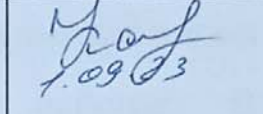
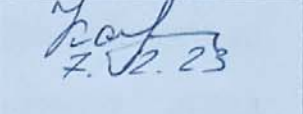

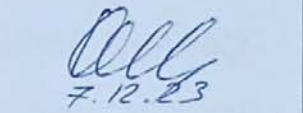
3. Вихідні дані до роботи Частота сигналу на лінії «вгору» 6 ГГц; частота сигналу на лінії «вниз» 4 ГГц; геостаціонарна орбіта; потужність передавача ЗС 100 Вт; потужність передавача ретранслятора 10 Вт; діаметри приймальної та передавальної антен БРТК 2,5 м; діаметр передавальної антени ЗС 12 м; підсилення приймальної антени ЗС 20 дБ; похила дальність 40000 км; швидкість передачі інформації 2 Гбіт/с.

4. Зміст текстової частини: Опис архітектури та компонентів супутникових систем; розподіл ресурсів супутникових ретрансляторів; оцінка варіантів багатостанційного доступу; оптимізація параметрів ССЗ для забезпечення високошвидкісного інтернет-доступу; підвищення спектральної ефективності та пропускну здатності в каналі передачі даних; прогнозне підвищення ефективності ССЗ; економічна частина; охорона праці та безпека життєдіяльності.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Системи супутникового зв'язку за варіантами маршрутизації; структурні схеми ретрансляторів з одним та подвійним перетворенням частоти, а також з бортовою обробкою; спрощена структурна схема земної станції ССЗ; структурна схема супутникової радіолінії; узагальнена структурна схема ССЗ;

залежність коефіцієнта помилок від відношення сигнал/шум; залежності пропускну здатності та бітової помилки.

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ	 1.09.23	 7.12.23
Аналіз економічної ефективності розробки	доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В.	 1.09.23	 7.12.23
Охорона праці та безпека життєдіяльності	професор кафедри БЖДПБ, д.п.н., доцент, Дембіцька С.В.	 1.09.23	 7.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

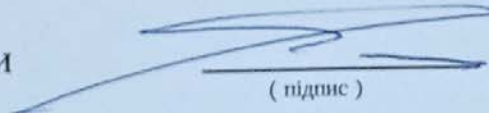
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Опис архітектури та компонентів супутникових систем	17.09.2023р.	
3.	Розподіл ресурсів супутникових ретрансляторів	06.10.2023р.	
4.	Оптимізація параметрів ССЗ для забезпечення високошвидкісного інтернет-доступу	27.10.2023р.	
5.	Методи підвищення ефективності ССЗ	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Кукленко М.С.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С.Т.

АНОТАЦІЯ

Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах. Магістерська кваліфікаційна робота / М. С. Кукленко – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 121 с., 22 рис., 20 – табл., 28 – бібл.– українською мовою.

Метою магістерської роботи є оптимізація параметрів та алгоритмів роботи системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах. Виконано огляд архітектури та компонентів супутникових систем. Проведено розподіл ресурсів супутникових ретрансляторів на основі аналізу енергетичного балансу. Оптимізовано параметри системи для забезпечення високошвидкісного інтернет-доступу. Змодельовано підвищення ефективності при застосуванні новітніх технологій.

Проведені економічні розрахунки та виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Optimization of satellite communication systems to provide high-speed and stable Internet access in remote areas. Master's qualification thesis / M. S. Kuklenko - Vinnytsia: VNTU, 2023. - 121 p., 22 figs., 20 tables, 28 - the bible - In ukrainian.

The aim of the master's thesis is to optimize the parameters and algorithms of the satellite communication system to ensure high-speed and stable Internet access in remote areas. An overview of the architecture and components of satellite systems was performed. The distribution of satellite relay resources was carried out based on the analysis of the energy balance. System parameters are optimized to ensure high-speed Internet access. The increase in efficiency with the use of the latest technologies is modeled.

Economic calculations were carried out and the section on labor protection and life safety was completed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОПИС АРХІТЕКТУРИ ТА КОМПОНЕНТІВ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ	9
1.1 Склад та основні характеристики систем супутникового зв'язку з рухомими об'єктами	9
1.2 Побудова бортових ретрансляторів ССЗ	14
1.3 Побудова земних станцій.....	20
1.4 Енергетичний розрахунок ССЗ РО	22
1.5 Висновки до розділу.....	31
2 РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ СУПУТНИКОВИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ	32
2.1 Оцінка варіантів багатостанційного доступу	32
2.2 Аналіз енергетичного балансу за критерієм високошвидкісного Інтернет-доступу	36
2.3 Висновки до розділу.....	44
3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ССЗ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ	45
3.1 Розрахунок пропускної здатності та складання плану частот.....	46
3.1.1 Вибір діапазону частот, ослаблення в дощі та урахування шумів космічних джерел	46
3.1.2 Запізнення сигналів при їх поширенні та виникнення відлуння	47
3.1.3 Методи багатостанційного доступу	49
3.2 Підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності в каналі передачі даних	51
3.2.1 Гранично досяжні швидкості передачі даних.....	51
3.2.2 Пропускна здатність каналів зв'язку з застосуванням спектрально ефективних методів модуляції	55
3.2.3 Пропускна здатність каналу зв'язку для технології з ортогональним частотним розділенням сигналів.....	57

3.2.4 Підвищення пропускної здатності каналу зв'язку застосуванням ВЧ-сигналів міліметрового діапазону радіохвиль.....	59
3.3 Висновки до розділу.....	64
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ССЗ	65
4.1 Технологія МІМО	65
4.2 Надширокосмугові системи	68
4.3 Перспектива об'єднання надширокосмугових сигналів з технологією МІМО.....	71
4.4 Технологія OFDM	73
4.5 Висновки до розділу.....	75
5 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ.....	76
5.1 Оцінювання наукового ефекту	76
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	79
5.2.1 Витрати на оплату праці	79
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	82
5.2.3 Сировина та матеріали	82
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	84
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	84
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	85
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	86
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	87
5.2.9 Службові відрядження.....	88
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	88
5.2.11 Інші витрати.....	89
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	89
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	90
5.4 Висновки до розділу.....	92
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	93

6.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	93
6.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	96
6.2.1	Мікроклімат.....	96
6.2.2	Склад повітря робочої зони.....	97
6.2.3	Виробниче освітлення	98
6.2.4	Виробничий шум.....	99
6.2.5	Виробничі випромінювання.....	99
6.3	Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження області працездатності РЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	100
6.3.1	Дія електромагнітних випромінювань на радіоелектронні системи	100
6.3.2	Визначення області працездатності приладу в умовах дії електромагнітних випромінювань	101
6.3.3	Розробка превентивних заходів з розширення області працездатності РЕС в умовах дії НС	102
6.4	Висновки до розділу.....	103
	ВИСНОВКИ.....	104
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	107
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	110
	Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	120

ВСТУП

Актуальність теми. Супутникові системи зв'язку охоплюють своїми послугами комерційну та військову сфери, дистанційне зондування Землі, забезпечують підтримку мобільного зв'язку у вигляді доступу до Інтернету і телеметрії в режимі реального часу з літаків та кораблів.

Швидкі темпи розвитку супутникових систем зв'язку (ССЗ) обумовлені перевагами якими вони наділені. До них, зокрема, відноситься висока якість та надійність каналів зв'язку, велика пропускна здатність, необмежені площини покриття та конфіденційність. Дані переваги, які визначають їхні широкі можливості, роблять ССЗ унікальними та ефективними засобами зв'язку. Супутниковий зв'язок нині є одним з основних видів міжнародного і військового зв'язку на великі та середні відстані. Використання супутників Землі в організації зв'язку продовжує розширюватися з розвитком існуючих телекомунікаційних мереж. Багато країн створюють власні національні мережі супутникового зв'язку [1-3].

Відмінною рисою супутникових радіоліній є великі втрати, зумовлені великою довжиною траси між ЗС і супутниковим ретранслятором (СР) та неідеальністю поширення радіохвиль. На трасі $(39-42) \cdot 10^3$ км згасання радіосигналу може становити понад 200 дБ [2-4].

Крім згасання сигналу на трасі радіолінії необхідно враховувати також втрати в антенно-фідерних трактах пристроїв передавачів та приймачів ЗС та СР, через неузгодженість поляризацій антен, через неточність наведення антен тощо. Поляризаційні втрати з'являються за рахунок зміни просторового положення ЗС і СР. Для їх усунення у ССЗ рекомендується в передавальних та приймальних антенах використовувати кругову поляризацію [3].

Аналіз останніх досліджень. Супутникові системи зв'язку відомі давно. З моменту своєї появи супутниковий зв'язок стрімко розвивався і поступово відбувся перехід до локальних і глобальних систем [1]. Найбільш відомі супутникові системи Ірідіум, INMARSAT, Globalstar, Starlink.

Iridium управляє угрупованням з 66 основних і 6 запасних супутників, розташованих в 6-ти орбітальних площинах. Висота орбіти 780 км, орбітальний період становить 100 хвилин 28 секунд. Кожен супутник покриває зону шириною в 4000 км. Супутник робить приблизно 1 оборот навколо Землі на годину. У зв'язку з цим сигнал абонента Ірідіум передається від супутника до супутника, не роблячи переривання. Наземні станції сполучення пов'язані одночасно як мінімум з двома супутниками з угруповання [3].

Globalstar являє собою ретранслятор з перетворенням частот. Він приймає сигнали в межах зони обслуговування, перетворює їх за частотою і передає на земну станцію. Всі операції по обробці викликів, перетворення сигналів і поділ каналів, комутацію виробляються на Землі, де реалізація даних функцій обходиться дешевше. КА в системі Globalstar простіше і надійніше через відсутність обробки сигналу на ньому, а також через відсутність ліній міжсупутникового зв'язку.

У системі Starlink супутники у космосі за допомогою лазерного променя працюють на частоті понад 10 ГГц. З наземними станціями зв'язок здійснюється у радіо (Ku- та Ka-) діапазонах на частоті 12 ГГц. Ka-антени забезпечують значно більшу пропускну здатність, а Ku-антени більш надійні у роботі за будь-якої погоди.

Прогнозна швидкість передачі даних – 1 Гбіт/с. Запуск 60 супутників може підтримувати 40 000 користувачів, які одночасно передають контент високої якості. Для геостаціонарного супутника мінімальна кругова затримка сигналу (туди-назад) становить 239 мс, іноді вона може сягати і 600 мс. Супутники Starlink обертаються на висоті в 1/30 цієї відстані, тому затримка сигналу становитиме лише 25-30 мс, що ближче до кабельного або оптоволоконного зв'язку. Є намагання досягти величини 10 мс.

Система Starlink потребує додаткового терміналу (супутникової тарілки із роутером). Це фазована антенна решітка, що відстежує супутники. Орієнтація при встановленні – у небо.

Для безпосереднього під'єднання до всесвітньої мережі SpaceX потребує

встановлення сотень наземних станцій обробки даних. Це невелика кількість завдяки наявності багатьох супутників. У випадку відсутності поблизу від користувача такої станції за допомогою лазера швидко передається між супутниками інформація, аж поки якийсь із супутників не “побачить” необхідну станцію. Це важливо для малозаселених територій. Термінал Starlink-2 є наземним елементом глобальної супутникової системи Starlink і служить для підключення до Інтернету бездротовим способом термінального обладнання користувачів [4, 5].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є оптимізація параметрів та алгоритмів роботи системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- огляд архітектури та компонентів супутникових систем;
- оптимальний розподіл ресурсів супутникових ретрансляторів з аналізом енергетичного балансу за критерієм високошвидкісного Інтернет-доступу;
- оптимізація параметрів ССЗ для забезпечення високошвидкісного інтернет-доступу з відповідними розрахунками;
- прогнозування підвищення ефективності ССЗ на основі сучасних технологій;
- економічні розрахунки;
- охорона праці та безпека життєдіяльності.

Об'єкт дослідження є процеси передачі та прийому сигналів.

Предмет дослідження є методи та засоби, які забезпечують підвищення швидкості передачі інформації та оптимізацію алгоритмів роботи ССЗ для високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу.

Методи досліджень базуються на використанні: теорії передачі інформації, теорії багатостанційного доступу в телекомунікаційних системах та аналізу ефективності складних систем.

Новизна одержаних результатів:

а) показано, що використання системами супутникового зв'язку багатостанційного доступу з кодовим розділенням забезпечує стійкість зв'язку до завмирань та конфіденційність інформації, що передається. Цей вид доступу є найбільш перспективним способом багатостанційного доступу, широке впровадження якого тимчасово стримується через складність його реалізації;

б) наведені рекомендації щодо оптимізації параметрів системи супутникового зв'язку для підвищення пропускної здатності в каналі передачі даних: використання спектрально ефективних методів модуляції, використання технології OFDM, використання ВЧ-сигналів міліметрового діапазону радіохвиль.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ЛП науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає в можливості використання її результатів при плануванні та експлуатації ССЗ, а також у навчальному процесі.

1 ОПИС АРХІТЕКТУРИ ТА КОМПОНЕНТІВ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

1.1 Склад та основні характеристики систем супутникового зв'язку з рухомими об'єктами

До складу системи супутникового зв'язку з рухомими об'єктами (ССЗ РО), структура якої наведена на рис. 1.1, незалежно від їх призначення входять такі компоненти [2]:

1) космічна станція (КС), що представляє собою супутниковий ретранслятор (СР), що включає в себе приймальний пристрій, антени для прийому і передачі радіосигналів, а також ряд систем забезпечення енергопостачання, орієнтації антен і сонячних батарей, корекції положення ШСЗ на орбіті тощо;

2) абонентські ЗС, які забезпечують дуплексний обмін інформацією;

3) центральна (координуюча) ЗС (ЦЗС), що забезпечує контроль за режимом роботи СР і дотриманням ЗС важливих для роботи ССЗ параметрів (потужності, що випромінюється, несущої частоти, виду поляризації, характеристик модульовального сигналу тощо);

4) центральна ЗС системи управління та контролю ШСЗ (ЦУС), що забезпечує управління всіма технічними засобами, розміщеними на ШСЗ, та контроль за їх станом;

5) сполучні наземні лінії (СНЛ), що забезпечують підключення ЗС до джерел і споживачів інформації, що передається;

6) центр управління (ЦУП) ССЗ, що представляє орган, який здійснює керівництво експлуатацією ССЗ та її розвитком.

По трафіку ССЗ РО поділяються на три типи [3]: «точка-точка» (рис. 1.2, а) – найпростіший випадок дуплексної лінії зв'язку між двома віддаленими станціями; «зірка» (рис. 1.2, б) — для багатоспрямованої радіальної передачі трафіку між центром мережі та периферійними (віддаленими) пунктами

зв'язку; «кожен із кожним» (рис. 1.2, в) — для забезпечення прямих зв'язків між будь-якими пунктами мережі зв'язку.

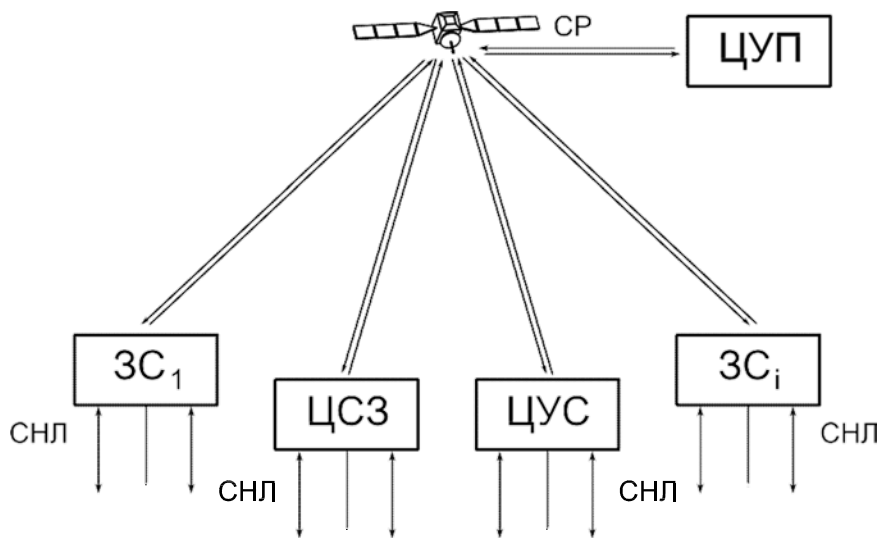


Рисунок 1.1 – Структура системи супутникового зв'язку

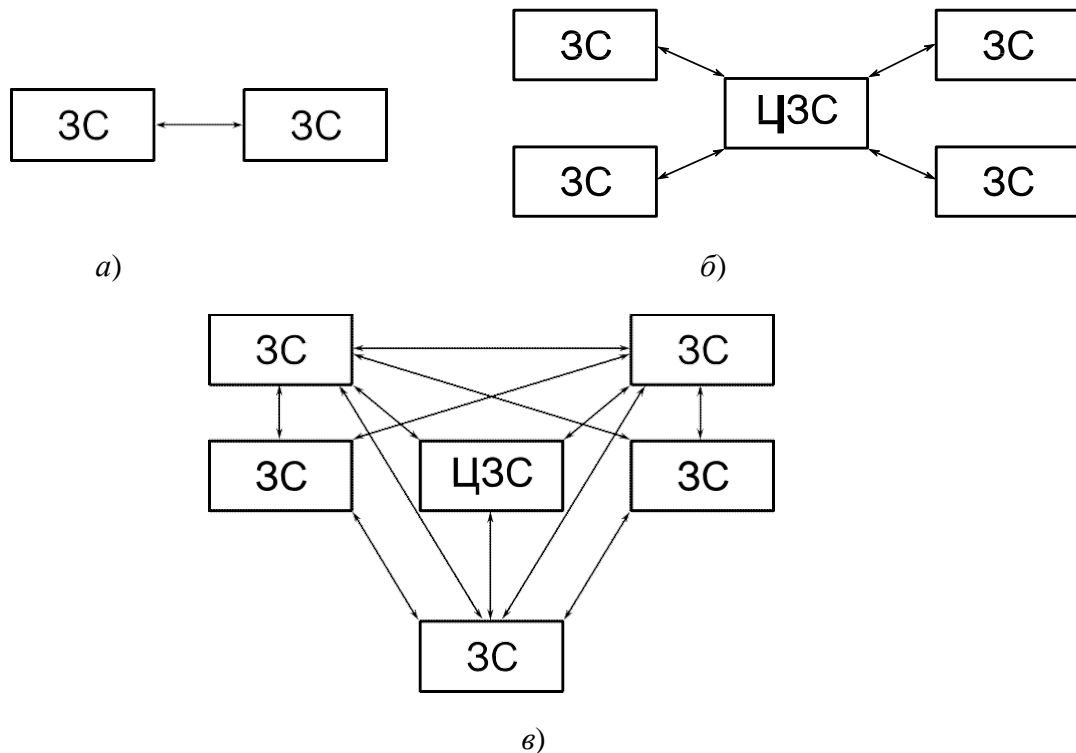


Рисунок 1.2 – Типи систем супутникового зв'язку РО

Мережа типу «точка-точка» забезпечує дуплексний зв'язок між двома віддаленими пунктами, найефективніша на великих відстанях між ними або при

їх розташуванні у важкодоступних регіонах, і навіть при великій величині трафіка між пунктами.

У найбільш поширених мережах типу «зірка» забезпечується багатоспрямована радіальна передача трафіку між центральною земною станцією мережі (ЦЗС) і віддаленими периферійними абонентськими ЗС за енергетично вигідною схемою: мала ЗС – велика ЦЗС, що володіє антеною великого діаметра і потужним передавачем. ССЗ РО подібного роду широко використовуються для організації інформаційного обміну між великим числом віддалених терміналів, що не мають взаємного трафіку, і центральним офісом фірми, транспортних або фінансових установ. Аналогічно побудовані телефонні мережі для обслуговування так званих віддалених абонентів, яким забезпечується вихід на телефонну мережу загального користування (ТМЗК) через ЦЗС, підключену до одного з наземних центрів комутації каналів [2-3].

Функції контролю та управління у мережі типу «зірка» зазвичай зосереджуються в ЦУС. ЦУС виконує службові функції, необхідні для встановлення з'єднань між абонентами мережі та підтримання робочого стану всіх периферійних терміналів. Така централізована система управління економічно доцільна для мереж з великою кількістю спрощених і дешевих периферійних терміналів.

За варіантами маршрутизації з'єднань через супутниковий ретранслятор ССЗ РО діляться на одно-, дво-, трискачкові та кільцеві з використанням міжсупутникових ліній зв'язку або наземних шлюзових станцій. ССЗ РО з односкачковим з'єднанням через СР (рис. 1.3, а) використовуються для забезпечення зв'язку двох ЗС у разі закріплених каналів або запиту ЗС з ЦЗС при наданні каналів на вимогу (НКВ).

ССЗ РО з двоскачковим з'єднанням через СР (рис. 1.3, б) призначені для забезпечення зв'язку між двома ЗС, що знаходяться в складі мережі, яка обслуговується однією ЦЗС. При цьому ЗС працюють у режимі «один канал на несущу» (ОКН), а ЦЗС виконує функції комутації, з'єднуючи ЗС одну з одною на вимогу, і навіть забезпечуючи вихід на наземні мережі зв'язку (НМЗ).

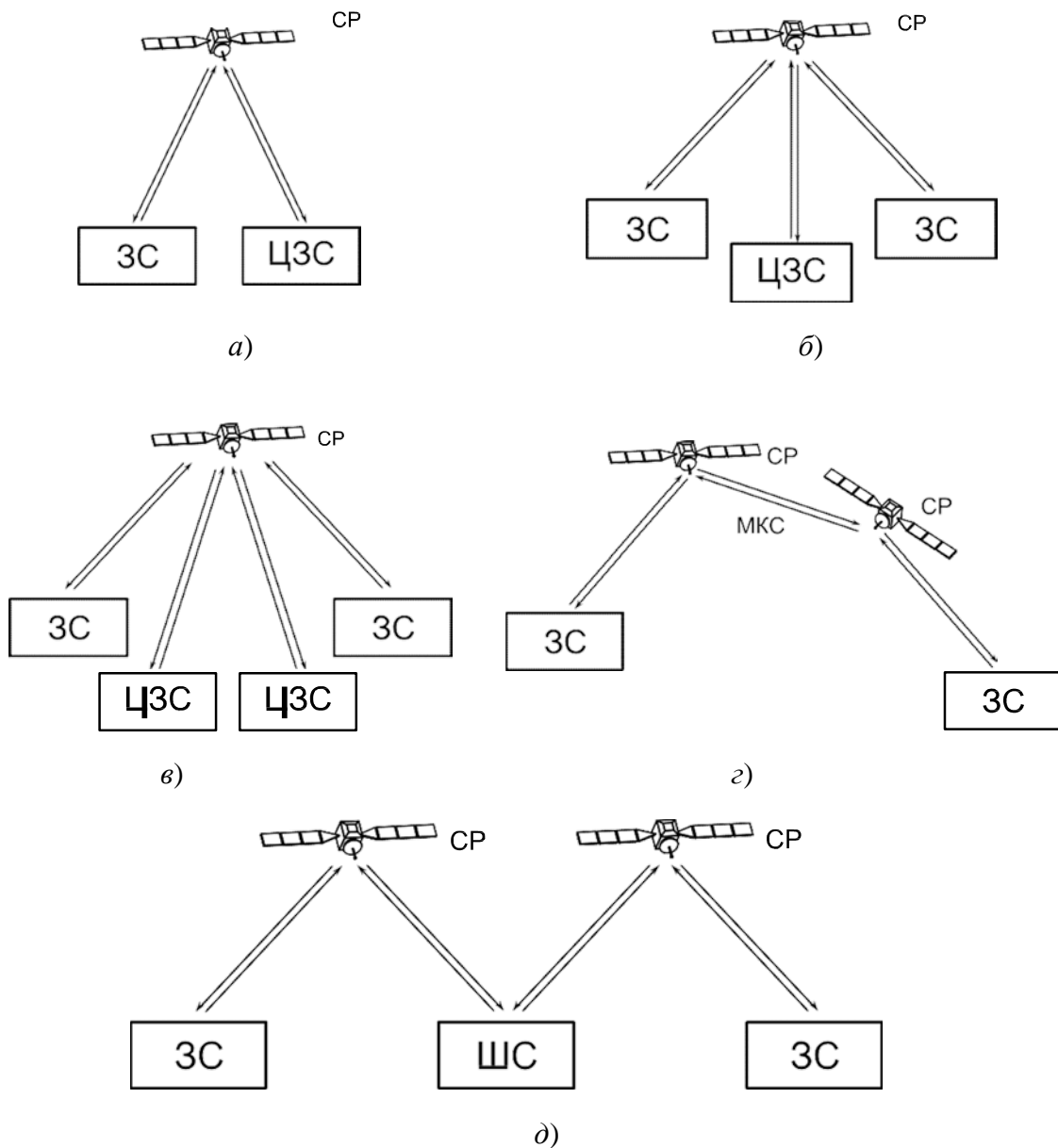


Рисунок 1.3 – Системи супутникового зв'язку за варіантами маршрутизації

ССЗ РО з трискачковим з'єднанням через СР (рис. 1.3, в) призначені для забезпечення зв'язку між ЗС, розташованими в зонах обслуговування різними ЦЗС. У перерахованих вище ССЗ використовується один СР, який може розміщуватися на ШСЗ з різною висотою орбіти [4].

При побудові ССЗ РО на основі використання декількох СР, що розміщуються на сузір'ї низькоорбітальних ШСЗ, залежно від призначення та технічних характеристик, у її складі є міжсупутникові канали зв'язку (МКС) (рис. 1.3, г) або наземні шлюзові станції (ШС) (Рис. 1.3, д). Подібні ССЗ РО

призначені для забезпечення регіонального або глобального зв'язку абонентських терміналів за принципом «кожний з кожним».

На початкових етапах розвитку ССЗ РО застосовувалися аналогові методи передачі.

В останні роки переважний розвиток отримало використання в ССЗ цифрових методів передачі, у зв'язку з тим, що при цьому забезпечується висока завадостійкість, стабільність параметрів каналів, гнучкість при побудові ССЗ різної конфігурації та модернізації режимів їх роботи, з'являється можливість більш повного використання пропускної спроможності каналів та підвищення техніко-економічних показників ССЗ.

Для передачі цифровими каналами аналогові сигнали піддаються аналого-цифровому перетворення. До найбільш поширених видів аналого-цифрового перетворення можна віднести імпульсно-кодову модуляцію (ІКМ), диференційну та адаптивно-диференціальну ІКМ, дельта-модуляцію, адаптивну дельта-модуляцію. Дослідження показали, що якісні показники мови в міжміських каналах забезпечуються при ІКМ зі швидкістю передачі 64 Кбіт/с, методи низькошвидкісного кодування дозволяють знизити цю швидкість до 32 Кбіт/с, а при використанні вокодерної обробки до $2,4 \div 4,8$ Кбіт /с [4].

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

Межі частотного діапазону, що використовується в ССР, визначаються великою кількістю факторів, з яких найбільш важливими є допустимі розміри антен ЗС і СР, особливості поширення радіохвиль і існуючою практикою розподілу частотного ресурсу між різними службами. Розподіл частотних смуг, що виділяються ССР РО знаходиться в стадії формування у зв'язку з рішеннями Всесвітніх адміністративних конференцій з радіозв'язку. У таблиці 1.1 наведені додаткові смуги, які виділені для реалізації ССЗ РО.

Таблиця 1.1 – Додаткові частотні смуги для реалізації ССЗ РО

Частотні діапазони	Призначення
137...138 МГц; 148...149,9 МГц; 272...273 МГц; 400,15...401 МГц; 312...315 МГц; 367...390 МГц	при використанні малопотужних передавачів та низькошвидкісних передач
1525...1544 МГц; 1610...1626,5 МГц	у напрямку Земля-Космос (З-К)
1970...2010 МГц; 2483...2520 МГц	у напрямку Космос-Земля (К-З)
5150...5250 МГц	у напрямку З-К для фідерних ліній ССЗ РО
5091...5150 МГц	у напрямку К-З для фідерних ліній ССЗ РО
7025...7075 МГц	для фідерних ліній ССЗ РО в обох напрямках
15,4 ... 15,7 ГГц; 19,3 ... 19,6 ГГц; 29,1 ... 29,4 ГГц	для міжсупутникових каналів зв'язку ССЗ РО

Досяжний на сучасному рівні науки і техніки енергетичний потенціал ЗС і СР дозволяє при побудові ССЗ РО реалізувати прийнятні швидкості передачі інформації.

1.2 Побудова бортових ретрансляторів ССЗ

Переважна більшість існуючих супутникових ретрансляторів (СР) використовує безпосередню ретрансляцію сигналів. При цьому супутник приймає сигнали від ЗС (лінія «вгору»), здійснює перенесення спектра сигналу, фільтрацію та перевипромінює сигнал на лінії «вниз».

БРТК (бортовий ретрансляційний комплекс) супутників з безпосередньою ретрансляцією можуть використовувати одноразове або подвійне перетворення частоти [4-5].

Спрощена структурна схема БРТК із безпосередньою ретрансляцією та одноразовим перетворенням частоти наведена на рисунку 1.4.

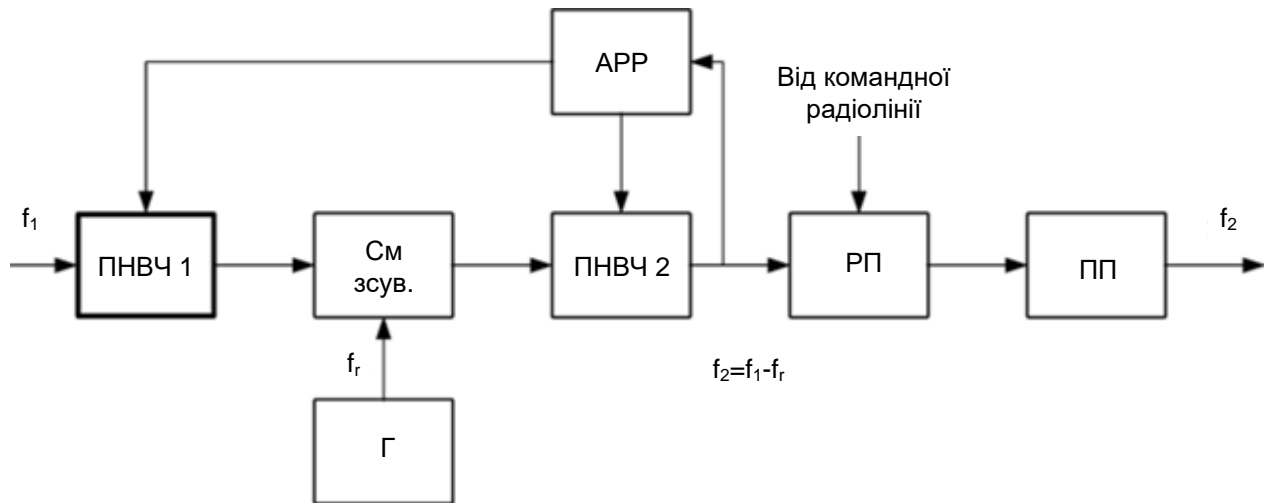


Рисунок 1.4 – Безпосередня ретрансляція з одним перетворенням частоти

Після попереднього підсилення і фільтрації спектр прийнятого сигналу зміщується в достатньо віддалену область нижчих частот з центральною частотою f_2 .

Рознесення центральних частот радіоліній «вниз» і «вгору» має бути не менше смуги частот, що ретранслюються. Далі сигнал підсилюється до рівня, необхідного для роботи кінцевого підсилювача потужності (ПП) і випромінюється в напрямку ЗС. Для підтримки необхідного рівня сигналу на вході ПП зазвичай використовується автоматичне регулювання підсилення або регулювання підсилення по командній радіолінії. Стабільність перетворення спектра зазвичай забезпечується синхронізацією високочастотного гетеродина від високостабільного еталона частоти за допомогою петлі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) [5].

При подвійному перетворенні частоти (рисунок 1.5) спектр вхідного сигналу зміщується в область проміжних частот (ПЧ), на яких здійснюється основне підсилення та фільтрація. Потім спектр переноситься в область частот радіоканалу «вниз». Використання досить низьких ПЧ дозволяє підвищити стабільність підсилення та покращити придушення позасмугового шуму

порівняно з одноразовим перетворенням. Найбільше це перевага подвійного перетворення проявляється під час передачі вузькосмугових сигналів.

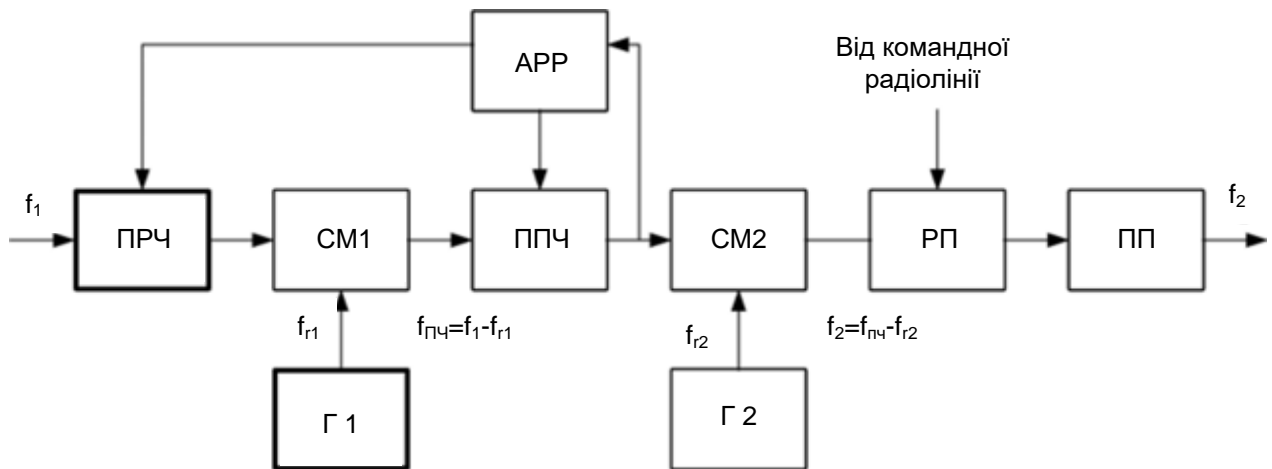


Рисунок 1.5 – Безпосередня ретрансляція з подвійним перетворенням частоти

На практиці смуга пропускання ретранслятора, яка може становити сотні мегагерц, розбивається на ряд більш вузьких смуг, кожна з яких перетворюється, підсилюється та фільтрується за допомогою окремих стовбурів (прийомопередавачів). Спільними для стовбурів є антени, широкосмугові попередні підсилювачі та генератори еталонних частот. Багатоствольність БРТК є наслідком технологічної складності створення надширокосмугових підсилювачів, що мають прийнятні амплітудно- та фазочастотні характеристики. Типові значення смуги пропускання стовбурів становлять 24, 36, 72 МГц і в міру вдосконалення технології мають тенденцію до розширення.

Традиційною схемою побудови БРТК з безпосередньою ретрансляцією є багатоствольна схема з числом стовбурів до декількох десятків і подвійним перетворенням частоти в кожному стовбурі [5-6].

Альтернативою безпосередньої ретрансляції є використання ретрансляторів із обробкою сигналів. Спрощену структурну схему БРТК ретранслятора з обробкою наведено на рисунку 1.6. З виходу лінійної частини

приймача (перетворення частоти, підсилення, лінійна фільтрація) сигнал надходить у демодулятор, потім регенерується. Оброблені сигнали кодується, модулюють несуще коливання, підсилюються і випромінюються. Бортова обробка забезпечує наступні переваги:

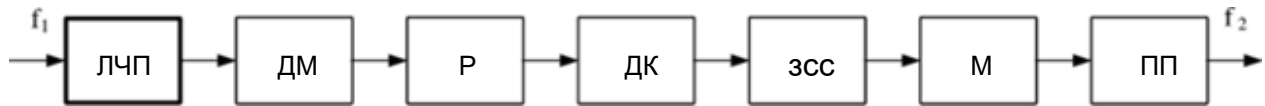


Рисунок 1.6 – Ретрансляція з бортовою обробкою

ЛЧП – лінійна частина приймача, ДМ – демодулятор, Р – регенератор, ДК – декодер, ЗСС – зміна структури сигналу та кодування, М – модулятор, ПП – підсилювач потужності

- виключається можливість безпосереднього проникнення шумів радіоканалу «вгору», у радіолінію «вниз», з'являється можливість незалежного вибору оптимальних структур сигналів у радіолініях «вгору» та «вниз»;

- при використанні багатопроменевих бортових передавальних антен з'являється можливість комутації інформаційних потоків між променями, що дозволяє суттєво підвищити пропускну спроможність мережі;

- при використанні багатопроменевих передавальних антен БРТК з'являється можливість суттєво підвищити пропускну спроможність мережі.

Але при бортовій обробці неминуче втрачається універсальність (обмеження, що накладаються обраними методами модуляції та кодування, регенерація), а ускладнення бортової апаратури загострює проблему забезпечення заданого рівня надійності.

Регенерація цифрових сигналів у БРТ з демодуляцією дозволяє отримати вигравш приблизно 3 дБ порівняно з лінійними (без демодуляції) методами їх побудови. Однак це справедливо за умови, що відношення сигнал/шум на входах бортового приймача та приймача ЗС приблизно однакові, тобто завадова обстановка як на лінії вгору, так і на лінії вниз повинна бути однаковою при однакових параметрах приймачів. На практиці відношення сигнал/шум, що

розраховується на лінії вгору, значно вище відповідного відношення на лінії вниз і одержуваний виграш виявляється ефективним лише за наявності на лінії вгору радіосигналів, що заважають, істотно спотворюють структуру ретрансльованих цифрових сигналів. Відзначимо також те, що виконання регенерації сигналів на борту вимагає значного ускладнення бортової апаратури.

Спробою компромісу, що поєднує переваги безпосередньої ретрансляції та бортової обробки є двоскачкова схема передачі, що передбачає наявність центральної станції, яка здійснює демодуляцію сигналів, вилучає необхідну маршрутну інформацію, здійснює цілеспрямовану комутацію інформаційних потоків (рисунок 1.3). Але в цьому випадку наявність двох стрибків сигналів при передачі подвоює затримку розповсюдження сигналів, а необхідність двох разів перевипромінювати одні і ті ж сигнали призводить до додаткових витрат ресурсів СР: вдвічі зростає необхідна смуга пропускання і зростають вимоги до його енергозабезпечення [4].

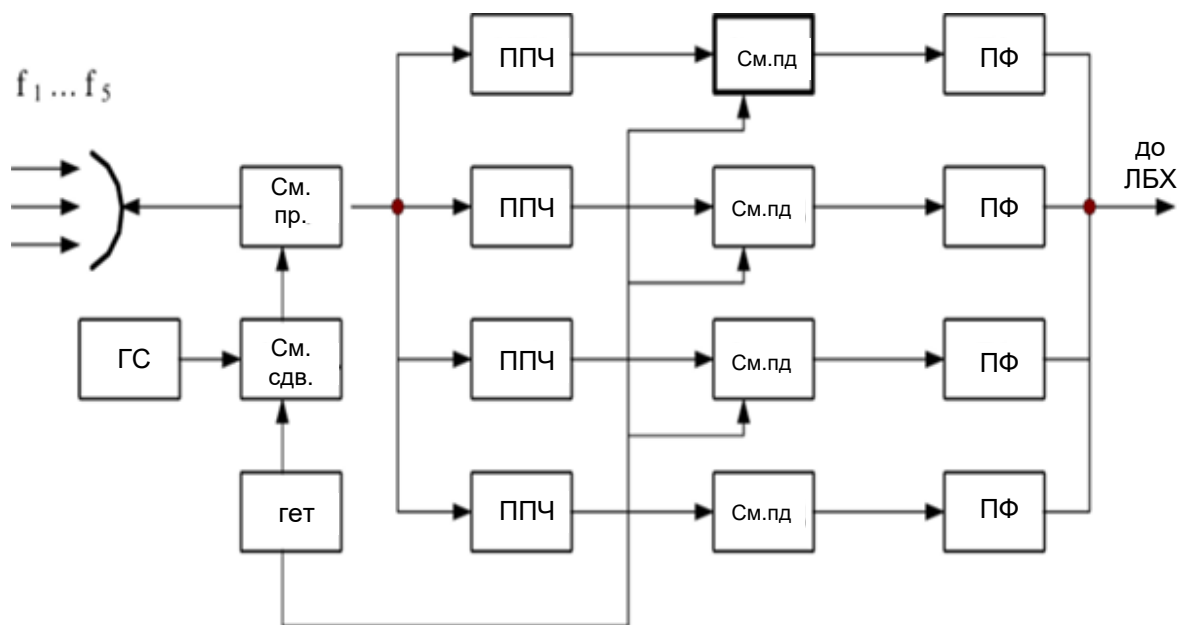


Рисунок – 1.7 – Спрощена структурна схема багатоствольного ретранслятора

У багатоствольних ретрансляторах з метою скорочення бортової апаратури прагнуть створити загальні блоки підсилення для кількох стволів. Приклад схеми бортового обладнання, розрахованого на передачу п'яти стволів, показано на малюнку 1.7.

Основне підсилення в кожному стволі здійснюється порівняно вузькосмуговим ППЧ на різних проміжних частотах, а потім, після обмеження та зміщення в область НВЧ, всі стволи об'єднуються для подальшого підсилення за допомогою ЛБХ. В ППЧ кожного ствола є обмежувач амплітуди та система АРП.

Необхідно ще раз відзначити, що одночасне проходження сигналів декількох стволів через загальний підсилювач, характеристики якого мають деяку нелінійність, буде призводити до появи перехідних шумів.

Зокрема, при одночасному підсиленні кількох стволів внаслідок нелінійності амплітудної та фазової характеристик між стволами виникнуть перехідні невиразні шуми. За наявності паразитної амплітудної модуляції хоча б в одному зі стволів з частотною модуляцією нелінійність фазовоамплітудної характеристики призведе до появи виразних перехідних шумів [5].

Рівень як невиразних, і виразних перехідних шумів залежить від режиму роботи і потужності сигналів на вході. Тому при одночасному підсиленні сигналів кількох стовбурів загальними підсилювачами розрахункова величина шумів ретранслятора повинна бути збільшена. Оскільки сумарне значення шумів на виході каналу визначається рекомендаціями МСЕ-Р залишається незмінним, то зазначене збільшення шумів ретранслятора призведе до необхідності зменшити теплові шуми на ділянках Земля – СР і СР – Земля.

Останнє можливе тільки при збільшенні потужності, що випромінюється станцією, що передає. На основі цього можна зробити висновок, що використання в ретрансляторі блоків, в яких здійснюється одночасне підсилення кількох стовбурів, вимагає збільшення потужності бортового та земного передавача або підвищення коефіцієнта підсилення передавальних антен.

Крім того, одночасне підсилення сигналів декількох стволів призводить до непропорційного зростання номінальної вихідної потужності вихідного каскаду, оскільки внаслідок нелінійності амплітудної характеристики вихідна потужність передавача повинна бути більшою за суму потужностей окремих стволів. Величина цієї відмінності визначається кількістю стовбурів та ступенем нелінійності амплітудних характеристик вихідного каскаду.

1.3 Побудова земних станцій

Земні станції ССЗ розрізняються за функціональним призначенням, пропускною спроможністю, складом і параметрами обладнання та вартості. Достатньо повно структурні схеми земних станцій розглянуті у [3]. На рисунку 1.8 наведено спрощену структурну схему ЗС, що включає принципово важливі елементи [6, 7].

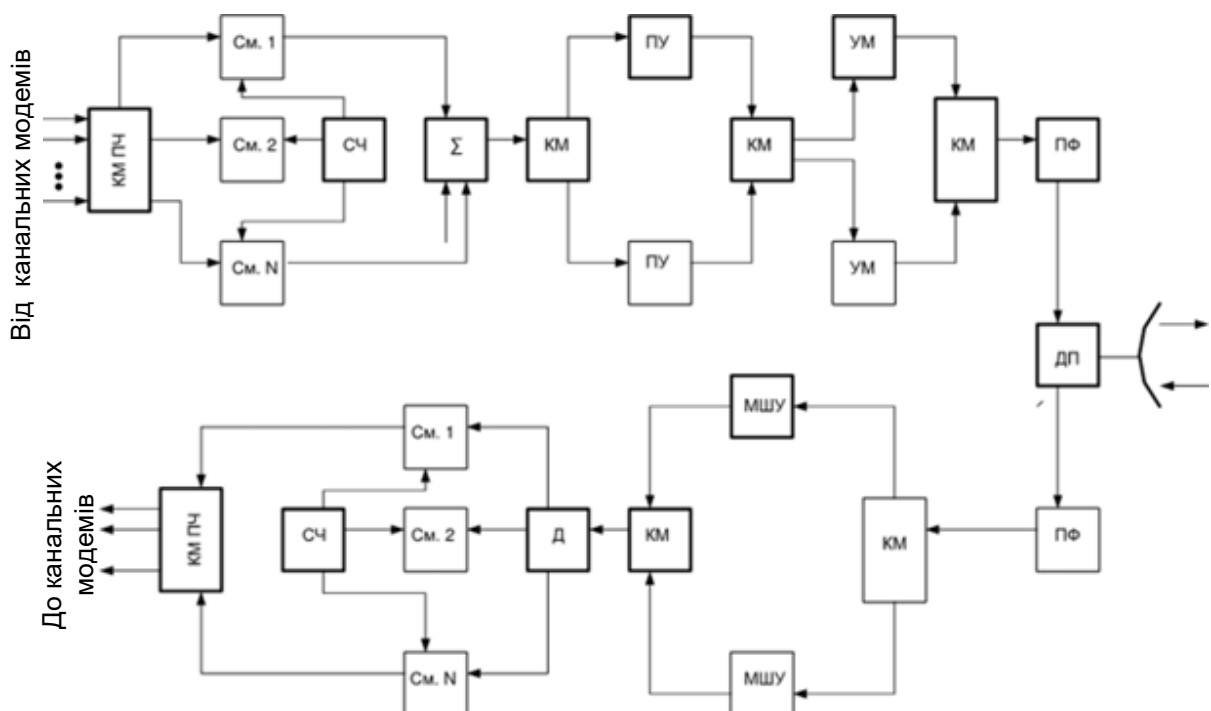


Рисунок 1.8 – Спрощена структурна схема земної станції ССЗ

На вхід станції від каналних модемів надходять модульовані сигнали ПЧ. Комутатор проміжної частоти КМ ПЧ забезпечує підключення абонентського сигналу до одного з перетворювачів частоти і автоматичне перемикання на резерв у разі аварійної ситуації.

Кожен із перетворювачів частоти транспонує сигнал ПЧ у робочий діапазон частот ССЗ (можливо одне або два перетворення частоти). Синтезатори частот СЧ зазвичай мають систему ФАПЧ. Підсилення НВЧ сигналів здійснюється в попередньому підсилювачі потужності та вихідному підсилювачі потужності. У цих підсилювачах найчастіше застосовують ЛБХ. Далі вихідний сигнал фільтрується з метою зменшення небажаних продуктів нелінійних спотворень. На схемі також показані комутатори КМ.

Згасання сигналу в тракті поширення, обумовлене втратами у вільному просторі, досягає 200 дБ (ця величина змінюється в залежності від діапазону частот, що використовується). Отже, повинна бути забезпечена надзвичайно велика розв'язка між трактами передачі та прийому, яка забезпечується дуплексером ДП та фільтрами у трактах передачі та прийому. Прийняті сигнали підсилюються низькошумним підсилювачем і надходять на дільник потужності Д, який розподіляє сигнали, що приймаються, на ряд понижуючих перетворювачів частоти.

Перетворювач частоти сигналу «вниз» перетворює НВЧ-сигнал у сигнал проміжної частоти. Зазвичай на передачі та прийомі використовуються однакові проміжні частоти, що дозволяє організувати шлейф під час проведення вимірювань.

Основні показники ССЗ включають показники як ЗС, так і КС, але ці показники характеризують інтегральні параметри системи в цілому [6]:

- зона видимості ШСЗ – частина поверхні землі, з якої ШСЗ видно під кутом місця більше деякої мінімально допустимої величини протягом заданої тривалості сеансу зв'язку;

- зона покриття – частина зони видимості, в якій забезпечуються необхідні енергетичні співвідношення на лінії зв'язку за певних енергетичних параметрів ЗС;

- зона обслуговування – частина землі, де розташовані ЗС цієї мережі, тобто зона, у якій необхідно забезпечити нормальну роботу земних станцій;

- зона обслуговування системи – об'єднання зони обслуговування окремих ШСЗ, що входять до системи. Термін об'єднання застосовано тому, що зони окремих ШСЗ накладаються одна на одну, тому загальна зона, виявляється, за площею менше суми площ окремих зон.

1.4 Енергетичний розрахунок ССЗ РО

Мета енергетичного розрахунку радіоліній, що входять до мережі супутникового зв'язку, полягає в обґрунтованому виборі енергетичних параметрів апаратури земних та космічних станцій, при яких забезпечується необхідна якість передачі інформації.

Розв'язання поставленої задачі здійснюється у відповідності до наступного алгоритму [7, 8]:

- Аналіз вихідних даних, нормування вимог до якості ділянок зв'язку, вибір (обґрунтування) параметрів, що відсутні;
- Розрахунок ослаблення радіосигналу на ділянках лінії супутникового зв'язку;
- Розрахунок енергетичних параметрів приймальних пристроїв;
- Розрахунок енергетичних параметрів передавальних пристроїв;
- Аналіз отриманих результатів та обґрунтування прийнятих технічних рішень.

Основними технічними вимогами, що висуваються до лінії, є наступні: пропускна спроможність, достовірність передачі повідомлень, схибленість, надійність і живучість, електромагнітна сумісність з іншими лініями, масогабаритні параметри.

На рисунку 1.9 представлено узагальнену структурну схему радіолінії супутникового зв'язку.

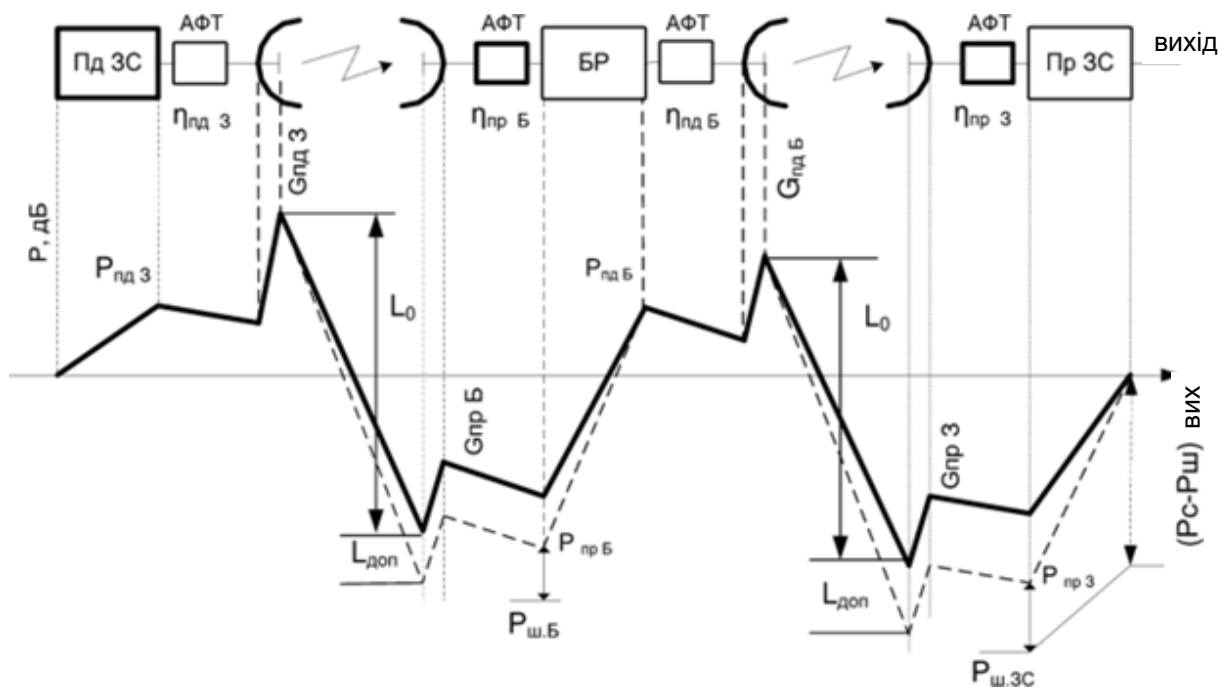


Рисунок 1.9 – Структурна схема супутникової радіолінії, що складається з двох ділянок

Розрахунок коефіцієнта помилок на виході лінії у разі БРТК із обробкою сигналів на борту [8].

У разі відомі все енергетичні параметри БРТК і земних станцій: потужності сигналів на виходах передавачів, втрати АФТ, коефіцієнти посилення антен, шумові параметри приймачів.

У лінії з обробкою сигналів у ретрансляторі коефіцієнти помилок на її ділянках є незалежними, тому:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{пом.вих}} &= 1 - (1 - K_{\text{пом.1}})(1 - K_{\text{пом.2}}) = K_{\text{пом.1}} + K_{\text{пом.2}} - K_{\text{пом.1}}K_{\text{пом.2}} = \\
 &= K_{\text{пом.1}} + K_{\text{пом.2}}, \tag{1.1}
 \end{aligned}$$

оскільки $K_{\text{пом.1}}K_{\text{пом.2}} \ll (K_{\text{пом.1}} + K_{\text{пом.2}})$, де цифри в індексах позначають відповідно «лінію вгору» та «лінію вниз».

Тому в ході розрахунку необхідно визначити відношення сигнал/шум на

входах приймачів відповідних ділянок лінії зв'язку ($P_{\text{пр}}/P_{\text{ш}}$) і знайти коефіцієнти помилок [7, 8].

Основною особливістю супутникової лінії зв'язку є велика довжина. Енергетичні параметри кожної з ділянок залежать від низки чинників. Це насамперед втрати, пов'язані з поширенням радіохвиль у вільному просторі, втрати у хвилеводних трактах прийому та передачі, втрати, пов'язані з поглинанням атмосфери, втрати від фарадеївського обертання площини поляризації, рефракції, деполяризації тощо.

Повний перелік всіх втрат є досить складним завданням, тому розглянемо лише основні чинники, які найбільше впливають на енергетику систем.

Введемо позначення: $P_{\text{нд}}$ – ефективна потужність сигналу на виході передавача, $\eta_{\text{пд}}$ – коефіцієнт передачі АФТ за потужністю (ККД), $G_{\text{пд}}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени відносно ізотропного випромінювача.

Введемо поняття еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (ЕІВП):

$$P_{\text{еівп}} = P_{\text{нд}} \cdot \eta_{\text{пд}} \cdot G_{\text{пд}}, \quad (1.2)$$

яка є добутком потужності передавача на підсилення антени. У теорії супутникового зв'язку цю характеристику розглядають як одну із найважливіших показників ССЗ. Відзначимо також, що паралельно з ЕІВП для характеристики енергетичних показників ССЗ вводять поняття добротності станції:

$$Q = G/T, \quad (1.3)$$

де G – підсилення антени на частоті прийому; T – сумарна шумова температура станції.

Якщо вважати, що випромінювана хвиля сферична і поширюється в усіх напрямках рівномірно, то зі зміною відстані щільність потоку потужності

зменшується пропорційно квадрату відстані d . Тоді потужність вхідного сигналу приймача [6]:

$$P_{\text{пр вх}} = \frac{(P_{\text{пд}} \cdot \eta_{\text{пд}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пд}} \cdot G_{\text{пр}})}{L_{\text{св}}}. \quad (1.4)$$

Основні втрати $L_{\text{св}} = (4\pi nd/X)^2$, де d – похила дальність.

У виразі (1.4) чисельник характеризує апаратурні параметри лінії, а знаменник – втрати у вільному просторі. У теорії радіозв'язку рівняння (1.4) називають основним рівнянням радіозв'язку, що встановлює зв'язок між потужностями сигналів прийому та передачі у вільному просторі.

Ефективна площа апертури пов'язана з коефіцієнтом підсилення антени наступним виразом:

$$G = (4\pi S_{\text{еф}})/\lambda^2. \quad (1.5)$$

Очевидно, що крім основних втрат існує й низка додаткових втрат, згаданих раніше. Сумарні втрати можуть бути враховані, якщо в знаменник виразу (1.4) підставити множник

$$L_S = L_0 \cdot L_{\text{дод}}, \quad (1.6)$$

де $L_{\text{дод}}$ – додаткові втрати.

Тепер можна визначити необхідну потужність передавача при заданій потужності сигналу на вході приймача ділянки лінії зв'язку ССЗ:

$$P_{\text{пд}} = \frac{(P_{\text{пр вх}} \cdot L_S)}{(\eta_{\text{пд}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пд}} \cdot G_{\text{пр}})}. \quad (1.7)$$

Сумарна потужність адитивних шумів, пов'язаних в основному з тепловими процесами, може бути апроксимована як

$$P_{\text{шс}} = k \cdot T_S \cdot \Delta f_{\text{ш}}, \quad (1.8)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{23}$ Вт/Гц • град – постійна Больцмана; $\Delta f_{\text{ш}}$ – еквівалентна шумова смуга приймача, Гц; T_S – еквівалентна шумова температура приймальної станції, приведена до входу приймача.

Таким чином, використовуючи отримані вирази, можна визначити значення коефіцієнтів помилки на кожній з ділянок лінії та результуюче відношення $K_{\text{пом.вих}}$ на виході лінії при заданих параметрах обладнання.

Виконаємо енергетичний розрахунок ССЗ для таких вихідних даних [7]:

- ШСЗ розташований на геостаціонарній орбіті;
- $P_{\text{прд зс}} = 100$ Вт; $P_{\text{прд б}} = 10$ Вт;
- діаметри приймальної та передавальної антен БРТК

$$D_{\text{прм б}} = D_{\text{прд б}} = 2,5 \text{ м};$$

- діаметр передавальної антени ЗС дорівнює $D_{\text{прдзс}} = 12$ м;
- підсилення приймальної антени ЗС – 20 дБ;
- шумова температура бортового приймача – 300° К;
- шумова температура приймача ЗС – 500° К;
- похила дальність 40000 км;
- кут місця 10 °;
- частота сигналу на лінії «вгору» – 6 ГГц;
- частота сигналу на лінії «вниз» – 4 ГГц.

Узагальнена структурна схема ССЗ наведена на рисунку 1.10.

Проведемо розрахунок відношення сигнал/шум на виходах бортового та земного приймачів (наявність регенератора на БРТК).

Знайдемо відношення сигнал/шум на виході приймача бортового ретранслятора.

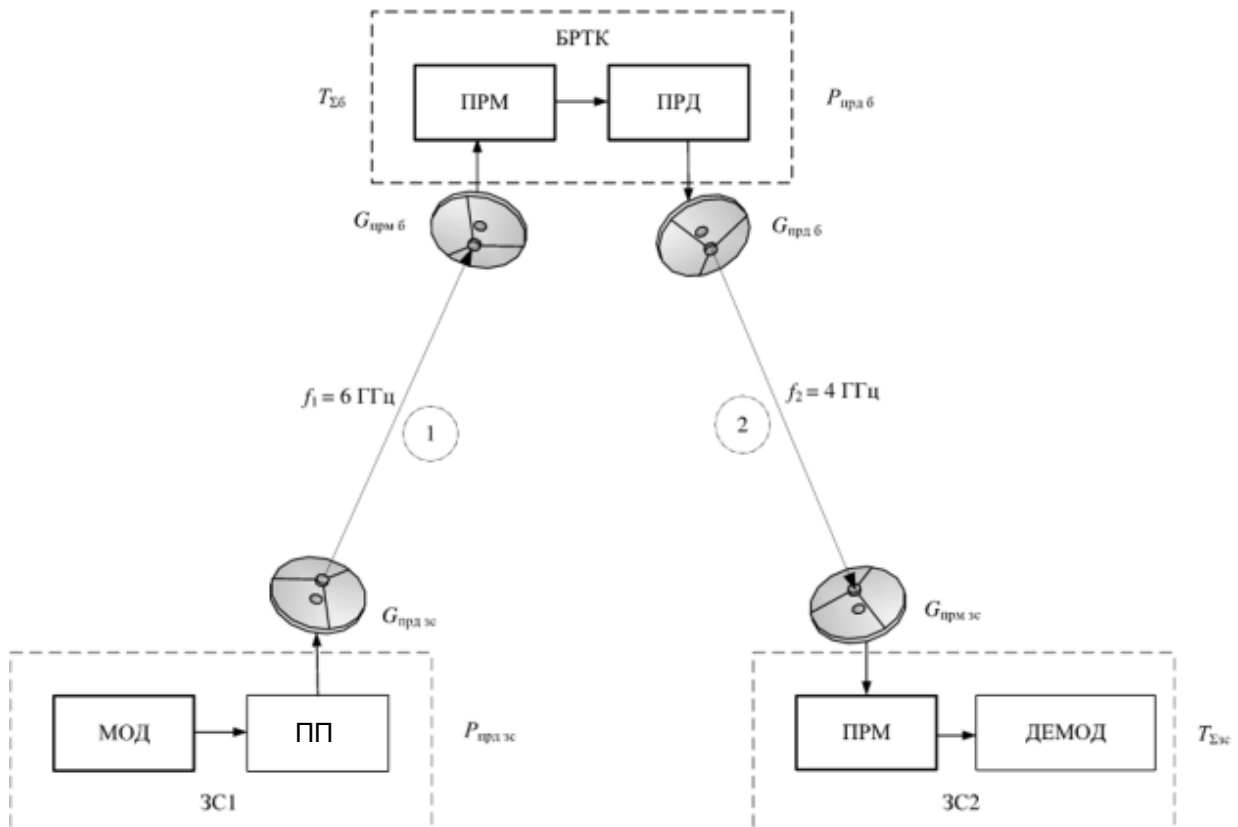


Рисунок 1.10 – Узагальнена структурна схема ССЗ

Передавальна станція характеризується еквівалентною ізотропно-випромінюваною потужністю (ЕІВП). Для ЗС1 ЕІВП дорівнюватиме [5]:

$$P_{\text{ЕІВП}} = P_{\text{прд зс}} + G_{\text{прд зс}} - L_{\text{св}}. \quad (1.9)$$

$$G_{\text{прд зс}} = \frac{\pi^2 \cdot D_{\text{прд}}^2}{\lambda^2} \cdot 0,7 = 310000.$$

Де: D – діаметр антени; 0,7 – ККД антени.

Оскільки $\lambda = c/f$, $f = 6$ ГГц, то $\lambda = 5$ см.

Втрати $L_{\text{св}}$ прийемо незначними – 1 дБ.

$$P_{\text{прд зс}} = 10 \lg P_{\text{прд}} = 10 \lg 100 = 20 \text{ дБ.}$$

$$G_{\text{прд зс}} = 10 \lg G_{\text{прд зс}} = 10 \lg 310000 = 55,2 \text{ дБ.}$$

$$P_{\text{ЕІВП}} = 20 + 55,2 - 1 = 74,2 \text{ дБ.}$$

Ослаблення енергії у вільному просторі визначається зменшенням густини потужності при віддаленні від випромінювача:

$$L_{\text{ВП}} = \left(\frac{4\pi R_0}{\lambda} \right)^2, \quad (1.10)$$

де R_0 – відстань між ЗС та ШСЗ в км.

Втрати у вільному просторі:

$$10 \lg L_{\text{ВП}} = 200 \text{ дБ.}$$

В атмосфері кисень та водяні пари поглинають енергію радіохвиль. Втрати під час поширення у атмосфері залежать від довжини шляху сигналу у атмосфері, і визначаються кутом місця. Товщина дощової зони для заданого кута місця 10° зазвичай становить 2 км. Відповідно до вихідних ці втрати становлять 204 дБ.

Враховуючи, що $G_{\text{прмб}} = 30$ дБ (діаметр антени 2,5 м), потужність сигналу на вході приймача ШСЗ дорівнюватиме [4]:

$$P_{\text{свх б}} = P_{\text{ЕІВП}} + G_{\text{прмб}} - L_S = 74,2 + 30 - 204 = -99,8 \text{ дБ.}$$

Рівень шумів на виході приймача (вхід демодулятора) визначається переважно ефективною шумовою температурою антени T_a та шумовими властивостями приймача. Сумарна ефективна шумова температура антени враховує вплив антени, середовища поширення радіохвиль та фідера:

$$T_{as} = T_a + T_0, \quad (1.11)$$

де T_a – ефективна шумова температура антени (ЕШТ); T_0 – шумова температура

фідера;

Антенa ШСЗ головним пелюстком діаграми спрямованості спрямовано Землю. І при врахуванні всіх факторів сумарна ЕШТ може бути визначена з виразу:

$$T_a = T_{зем} + T_{атм} + 2\varepsilon \cdot T_k = 290 + 30 + 6 = 326^0 K.$$

При $f = 6$ ГГц і $\alpha = 10^\circ$, $T_{атм} = 30^\circ$ К, $T_k < 10^\circ$ К і $T_{зем} = 290^\circ$ К; $\varepsilon = 0,3$.

Потужність теплових шумів на вході приймача без урахування шумових властивостей визначається формулою (1.8). При $\Delta f_{ш} = 40$ МГц потужність шумів дорівнює [3]:

$$P_{швх прм} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 326 \cdot 40000000 = 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ Вт, що відповідає} \\ 2,5-140 = -137,5 \text{ дБ.}$$

Знайдемо потужність шумів на виході приймача. Застосуємо ту ж формулу (1.8).

$$P_{швих прм} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (326 + 300) \cdot 40000000 = 3,4 \cdot 10^{-13} \text{ Вт, відповідає} \\ 5,3-130 = -124,7 \text{ дБ.}$$

Таким чином, відношення сигнал/шум на вході бортового приймача дорівнює:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_B = P_{свхб} - P_{швихпрм} = -99,8 + 124,7 = 25 \text{ дБ.}$$

Припустимо, що на лінії «вгору» використовується QPSK. Тоді по кривій рисунка 1.11 можна визначити коефіцієнт помилок $K_{пом} < 10^{-10}$.

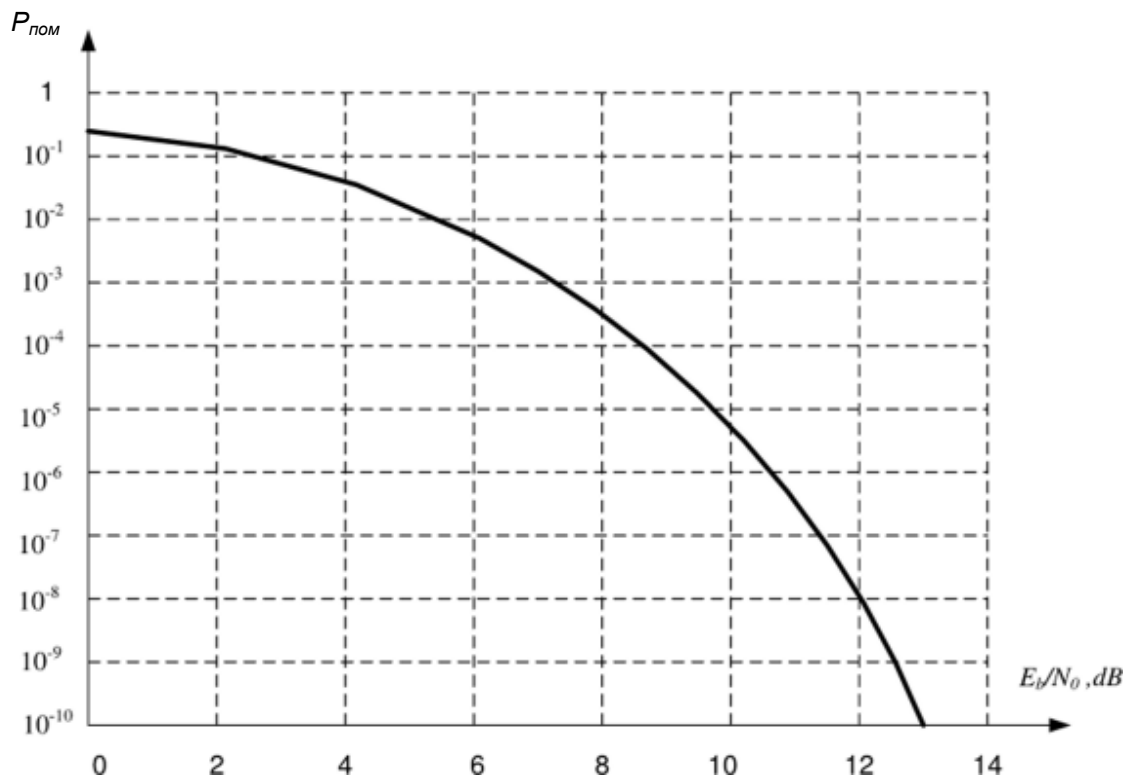


Рисунок 1.11 – Залежність коефіцієнта помилок від відношення сигнал/шум

Проведемо аналогічний розрахунок для лінії «вниз».

Потужність корисного сигналу на вході приймача ЗС2 дорівнює [5]:

$$P_{\text{свхзс2}} = 39 - 197 + 20 = -115,5 \text{ дБ.}$$

Потужність шумів на виході приймача ЗС:

$$P_{\text{швих прм}} = 1,38 \cdot 10^{-23} (326 + 500) \cdot 40000000 = 4,5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{швих прм}} = 5,6 - 130 = -124,4 \text{ дБ.}$$

Відношення сигнал/шум на виході приймача земної станції:

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_3 = -115,5 + 124,4 = 8,9 \text{ дБ.}$$

Значення коефіцієнта помилок на виході приймача земної станції $K_{\text{пом}} < 10^{-5,5}$.

За наявності регенератора на БРТК результуючий коефіцієнт помилок на

виході приймача земної станції дорівнює $K_{\text{пом}} < 10^{-5,5}$, оскільки аналогічним коефіцієнтом для напрямку «вгору» можна знехтувати.

1.5 Висновки до розділу

Розглянуто структуру системи супутникового зв'язку та призначення її складових частин: космічного сегменту, сигнальної частини, користувачького сегменту, наземного сегменту. Показано, що супутниковий зв'язок базується на використанні штучних супутників Землі і здійснюється між земними станціями, які можуть бути як стаціонарними, так і мобільними.

Проаналізовано варіанти побудови бортових ретрансляторів ШСЗ. Переважна більшість існуючих супутникових ретрансляторів використовує безпосередню ретрансляцію сигналів. З цієї метою застосовуються схеми з одноразовим або подвійним перетворенням частоти. Зазначено, що традиційною схемою побудови БРТК з безпосередньою ретрансляцією є багатоствольна схема з числом стовбурів до декількох десятків і подвійним перетворенням частоти в кожному стовбурі. Наведена альтернативна структурна схема, у якій використовується ретранслятор з обробкою сигналів.

Наведена структурна схема та проаналізована робота земної станції.

Якісний зв'язок у ССЗ забезпечується необхідним для всіх радіоліній енергетичним балансом. В ССЗ РО використовується п'ять типів радіоліній: радіолінії «вгору» (ЗС – СР, ЦЗС – СР), радіолінії «вниз» (СР – ЗС, СР – ЦЗС) та радіолінії між ШСЗ (СР – СР). Визначені в результаті енергетичного розрахунку основні параметри каналів зв'язку ЗС – СР та СР – ЗС, які є найбільш чутливими в енергетичному відношенні з урахуванням роботи мобільних терміналів.

2 РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ СУПУТНИКОВИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ

2.1 Оцінка варіантів багатостанційного доступу

Вартість космічного сегмента при побудові системи супутникового зв'язку (ССЗ) з рухомими об'єктами значна, тому доцільно застосовувати такі принципи побудови мережі зв'язку, які давали б можливість використовувати один супутниковий ретранслятор (СР) для великої кількості наземних абонентів. Мова йде про розподіл ресурсів СР, тобто потужності випромінювання та робочої смуги частот.

Можливі варіанти розподілу ресурсів СР [8]:

- 1) використання декількох СР, що працюють у різних частотних діапазонах, з метою формування на ШСЗ декількох стволів;
- 2) багатостанційний доступ в стволі з відповідним розподілом каналів;
- 3) динамічний розподіл, який передбачає надання каналів або груп каналів для їх колективного використання на основі розподілу запитів.

В ШСЗ, як правило, встановлюється декілька незалежних СР. Кожен СР має вхідний фільтр, який забезпечує прийом сигналів у бажаній смузі частот. Формування незалежних каналів у цьому випадку можна побудувати на використанні ортогональних структур сигналів, а розподіл ресурсів на основі багатостанційного доступу (БД) може бути таким: частотне ущільнення (БДЧУ), часове ущільнення (БДЧсУ) і кодове ущільнення (БДКУ).

Багатостанційний доступ з частотним ущільненням каналів досягається шляхом поділу повної смуги СР між різними групами несущих та обмеження частотної смуги передачі для кожної несущої виділеним піддіапазоном. Режим роботи СР у цьому випадку близький до лінійного, тому потужність, що виділяється для кожної несущої приблизно зворотно пропорційна кількості каналів в ретрансляторі. БДЧУ може використовуватися для передачі як аналогових, так і цифрових сигналів. Економічно доцільно використовувати БДЧУ для групоутворення на лініях далекого телефонного зв'язку, які

обслуговують запити, що надходять з великою шпаруватістю, що не вимагають високих швидкостей передачі даних. Частотне ущільнення трафіку застосовують у тих випадках, коли повний трафік, що виходить від земної станції (ЗС), невеликий і має невелику інтенсивність.

У разі БДЧсУ формування каналів здійснюється шляхом часового поділу всієї виділеної смуги робочих частот і потужності між різними запитами. Для успішної передачі повідомлень передачу через ШСЗ у будь-який заданий час має вести лише одна ЗС, тому вимоги до управління потужністю тут мінімальні. При часовому розділенні каналів використовується кадрова структура, що на відміну від методів безперервної передачі передбачає необхідність загальномережевої синхронізації всіх ЗС та використання пакетів із цифровими сигналами. Час, що надається ЗС для синхронної передачі, залежить від загальної синхронізації, що встановлюється або безпосередньо лідером - провідною станцією, або непрямим шляхом, з урахуванням затримки поширення сигналу на трасі З-К, яка зазвичай вимірюється земною станцією, що приймає свою власну передачу [9].

За допомогою методів кодування з різною надмірністю, або простих змін виду і параметрів модуляції системи БДЧУ і БДЧсУ можна пристосувати до різних умов поширення і до ЗС, прийомні характеристики яких можуть відрізнятися на $10\div 15$ дБ. У разі БДЧсУ один пакет може містити повідомлення, призначені для станцій із різними швидкостями прийому.

Для ССЗ розроблено різні методи розподілу пропускної спроможності СР за запитами. Ці методи поділяють на дві групи: методи комутації каналів, призначені для обробки телефонних повідомлень, та методи комутації пакетів, призначені для обробки даних. У другій групі виділяють три способи: випадковий доступ, неявне резервування та явне резервування.

В системах з часовим ущільненням та комутацією каналів пропускна здатність СР розподіляється каналами шляхом організації багатостанційного доступу з частотним ущільненням (БДЧУ). Відбувається динамічний перерозподіл всіх каналів системи, крім одного службового, згідно з запитами

станцій. Отже, кожній станції у кадрі службового каналу постійно виділяється один часовий сегмент. Коли на інтерфейс ЗС по лінії наземного зв'язку надходить новий запит на з'єднання (виклик), ця станція посилає на власному сегменті службового каналу вимогу на виділення двостороннього каналу, тобто пари каналів із сукупності перерозподілених каналів БДЧУ. За наявності хоча б одного вільного каналу між станцією, що викликає і викликається, встановлюється повний дуплексний зв'язок. Після закінчення з'єднання кожна з пари станцій звільняє канал шляхом посилки сигналів у власному сегменті службового каналу.

У системі з БДЧсУ кожному каналу в межах кадру виділяється часовий сегмент. У кожному кадрі канали розподілені на групи, причому кожній абонентській станції виділено свою групу. Кількість каналів у кожній групі періодично перерозподіляється, так що ЗС з великою пропускнуою здатністю можуть використовувати велику кількість каналів.

При створенні ССЗ з комутацією пакетів були потрібні розробки нових методів розподілу пропускнуої спроможності СР з комутацією пакетів і множинним або багатостанційним доступом абонентських станцій до супутникової системи. Метод організації зв'язку, що отримав назву методу «комутації пакетів» (КП), передбачає поділ вхідного інформаційного потоку на невеликі сегменти або пакети даних, які переміщуються через мережу зв'язку або мережі передачі даних аналогічно листам у поштовій системі, але зі значно більшою швидкістю. Системи, що використовують цей метод, забезпечують значне підвищення ефективності, порівняно з системами комутації каналів, але мають більш складну систему управління. Остання обставина стала і технічно і економічно переборною за останнє десятиліття завдяки бурхливому розвитку мікросхем і мікропроцесорної техніки.

Особливістю супутникового зв'язку, що обумовлена самим принципом цього виду зв'язку, є можливість одночасного доступу до СР сигналів декількох ЗС. Пропускна здатність СР виявляється при цьому дещо нижчою, ніж в односигнальному режимі роботи. Залежно від методу розділення сигналів на

прийомі розрізняють три основні способи багатостанційного доступу (БСД): з частотним поділом каналів (БДЧР), з часовим поділом (БДЧсР) та з кодовим поділом (БДКР).

БДЧР є найпростішим і найпоширенішим методом, що використовується як в аналогових, так і цифрових ССЗ. При БДЧР кожна ЗС передає свої сигнали у відведеній ділянці смуги пропускання СР. Основний недолік БДЧР - зменшення пропускнуої спроможності в порівнянні з односигнальним режимом, викликане необхідністю зменшення на 4...6 дБ потужності вихідного підсилювача ретранслятора через появу інтермодуляційних перешкод. Крім того, необхідно забезпечити високу стабільність частоти та потужності сигналу, що випромінюється кожною ЗС. У системах з БДЧР передача може здійснюватися як багатоканальними сигналами, так і одноканальними з використанням принципу передачі «один канал на несущій» (ОКН). Метод ОКН застосовують в основному в мережі станцій з невеликим числом каналів. Основна перевага методу полягає у можливості реалізації принципу надання каналів на вимогу (НКВ). Метод БДЧР широко використовується в ССЗ багатьох країн.

БДЧсР знайшов застосування у зв'язку з реалізацією цифрових методів передачі. При цьому кожній ЗС для випромінювання сигналів виділяється певний часовий інтервал, який періодично повторюється. Інтервали випромінювання всіх станцій взаємно синхронізовані, через що не відбувається їх перекриття. У кожний момент часу через СР проходить сигнал лише однієї станції та відсутня нелінійна взаємодія сигналів різних ЗС в підсилювачі СР. Метод БДЧсР отримує розвиток для передачі даних великої кількості абонентських станцій, підключених до мережі цифрового телефонного зв'язку, коли з допомогою апаратури ущільнення каналів здійснюється організація передачі через ЦЗС.

БДКР заснований на одночасній передачі в смузі частот СР сигналів кількох станцій, модульованих інформаційним сигналом і кодовим сигналом у вигляді довгої псевдошумової послідовності. При прийомі інформації

використовують методи когерентної обробки та узгодженої фільтрації, що забезпечує високу завадостійкість і завадозахищеність. Використання в багато станційному доступі з кодовим розділенням каналів сигналів з великою базою дозволяє суттєво знизити рівень потужності, яка випромінюється ЗС та СР і покращити показники електромагнітної сумісності.

Використання системами супутникового зв'язку БДКР забезпечує стійкість зв'язку до завмирань та конфіденційність інформації, що передається. БДКР є найбільш перспективним способом багато станційного доступу, широкое впровадження якого тимчасово стримується через складність його реалізації.

2.2 Аналіз енергетичного балансу за критерієм високошвидкісного Інтернет-доступу

Для забезпечення якісного зв'язку в ССЗ необхідно забезпечити у всіх радіолініях певний енергетичний баланс. У ССЗ використовуються п'ять типів радіоліній: радіолінії вгору «Земля-Космос» (З-К) типу ЗС-СР, ЦЗС-СР; радіолінії вниз "Космос-Земля" (К-З) типу СР-ЗС, СР-ЦЗС і радіолінії "Космос-Космос" (К-К) типу СР-СР. При цьому найбільш напруженими в енергетичному відношенні є радіолінії ЗС-СР і СР-ЗС у зв'язку з тенденцією переходу в ССЗ для рухомих об'єктів від мобільних земних терміналів до «ручних, приватних» терміналів, тобто до суттєвого зниження потужності передавача ЗС [10].

Відмінною особливістю супутникових радіоліній є великі втрати, зумовлені великою довжиною траси між ЗС та СР та неідеальністю поширення радіохвиль. Так, при розміщенні СР на геостаціонарному ШСЗ при трасі завдовжки $(39...42) \cdot 10^3$ км згасання радіосигналу у трьохсантиметровому діапазоні хвиль може становити понад 200 дБ.

Крім згасання сигналу на трасі радіолінії в космічному просторі необхідно враховувати втрати в трактах антенно-фідерних пристроїв передавачів і приймачів ЗС і СР, в процесі поширення радіохвиль в атмосфері Землі, через наявність неузгодженості поляризацій антен ЗС і СР, через

неточність наведення антен тощо. У ССЗ РО поляризаційні втрати з'являються не тільки за рахунок впливу магнітного поля Землі та атмосфери, а й за рахунок зміни просторового положення ЗС та СР. З метою усунення поляризаційних втрат в ССЗ РО рекомендується в передавальних і приймальних антенах використовувати кругову поляризацію одного напрямку обертання.

Слід також враховувати, що на приймальні пристрої ЗС і СР, крім теплових флюктуаційних шумів, можуть впливати різного роду ненавмисні перешкоди, пов'язані з випромінюванням Космосу, Сонця, планет, супутників, що знаходяться на різних орбітах, наземних радіотехнічних засобів та інших джерел завад.

У загальному випадку слід розраховувати на роботу ССЗ РО в найбільш несприятливих умовах із найменшими енергетичними витратами.

При даному аналізі будемо вважати атмосферу однорідною та ідеальною, а вплив Землі та поляризаційних втрат нехтовно малими. Кожна радіолінія складається з передавальної частини, радіотракту і приймальної частини. До основних характеристик радіолінії відносяться [9, 10]:

- потужність передачі P_n , віднесена до одного каналу;
- коефіцієнт підсилення передавальної антени G_n ;
- коефіцієнт підсилення приймальної антени G_{np} ;
- коефіцієнт втрат у вільному просторі L ;
- коефіцієнт додаткових втрат у радіолінії ΔL ;
- потужність вхідного (приймального) сигналу P_{np} , віднесена до одного каналу.

Потужність передачі пов'язана з вихідною потужністю передавача P_e співвідношенням

$$P_{\Pi} = G_{\Pi} \cdot P_e, \quad (2.1)$$

де G_{Π} - коефіцієнт втрат у фідері передавача.

Коефіцієнт підсилення антени (передавальної або приймальної) G показує, який виграш забезпечується нею у потужності сигналу в порівнянні з ненаправленою антеною. Максимальне значення коефіцієнта підсилення G_m становить

$$G_m = \frac{4\pi S_a}{\lambda^2}, \quad (2.2)$$

де S_a - ефективна площа антени; λ - довжина хвилі.

Коефіцієнт втрат у вільному просторі враховує розсіювання електромагнітної енергії в просторі при ізотропному поширенні радіохвиль і визначається за формулою

$$L = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2, \quad (2.3)$$

де r - відстань між ЗС і СР.

Величина додаткових втрат у лінії ΔL обумовлена поглинанням радіохвиль в атмосфері та завмиранням внаслідок багатопроменевості істотно залежить від кута місця антени ЗС і змінюється в межах від 1,5 дБ до 6 дБ.

Потужність сигналу на вході приймального пристрою P_c пов'язана з потужністю вхідного сигналу P_{np} співвідношенням

$$P_c = G_{np} \cdot P_{np}, \quad (2.4)$$

де G_{np} - коефіцієнт втрат у фідері приймача.

Основні енергетичні параметри радіолінії взаємопов'язані рівнянням радіопередачі

$$P_{np} = \frac{P_n \cdot G_n \cdot G_{np}}{L \cdot \Delta L}. \quad (2.5)$$

Енергетичний потенціал радіолінії характеризується відношенням потужності вхідного сигналу $P_{\text{пр}}$ до спектральної щільності шумів на вході приймача N_0

$$\frac{P_{\text{пр}}}{N_0} = \frac{P_n \cdot G_n \cdot \left(\frac{G_{\text{пр}}}{T_{\text{пр}}} \right)}{k \cdot L \cdot \Delta L}, N_0 = k \cdot T_{\text{пр}}, \quad (2.6)$$

де $k = 1,39 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц·гр - постійна Больцмана; $T_{\text{пр}}$ - шумова температура приймального пристрою за шкалою Кельвіна; $P_n G_n$ - еквівалентна ізотропно випромінювана потужність, Вт; $G_{\text{пр}}/T_{\text{пр}}$ - добротність приймального пристрою, К⁻¹.

У процесі розрахунку енергетичного потенціалу радіолінії одночасно з потужністю вхідного сигналу $P_{\text{пр}}$ використовується щільність потоку потужності на одиничній площадці

$$W = \frac{P_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} = \frac{G_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot S_{\text{пр}}}{4\pi r^2 \Delta L}, \quad (2.7)$$

де $S_{\text{пр}}$ - ефективна площа приймальної антени.

При використанні в СР багатостанційного доступу на основі частотного розділення каналів необхідно додатково враховувати завади за рахунок взаємної модуляції (інтермодуляційні), які розглядаються як флуктуаційний шум з спектральною щільністю I_0 .

При цьому остаточне відношення сигнал/завада на виході СР визначається залежністю

$$\frac{P_{\text{пр}}}{N_0 + I_0} = \frac{P_{\text{пр}}}{N_0} \cdot \frac{P_{\text{пр}}}{I_0} \left(\frac{P_{\text{пр}}}{N_0} + \frac{P_{\text{пр}}}{I_0} \right)^{-1}. \quad (2.8)$$

У загальному необхідно також вирішувати проблему електромагнітної сумісності (ЕМС) даної системи з іншими космічними та наземними

системами, що функціонують у спільних смугах частот. Для цього встановлюються обмеження на енергетичні потенціали СР та ЗС залежно від частотних діапазонів.

Розглянемо розрахунок ССЗ РО на прикладі архітектури «крапка-крапка», що забезпечує дуплексний одноканальний зв'язок при використанні сигналів з квадратурною фазовою маніпуляцією QPSK зі швидкістю передачі інформації R і достовірністю, яка відповідає заданому рівню імовірності помилкових рішень $P_{ном}$ [11].

Структура згаданої ССЗ РО при використанні СР з прямою ретрансляцією і частотним розділенням каналів при передачі інформації від ЗС₁ до ЗС₂ наведена на рисунку 2.1, де прийняті такі позначення:

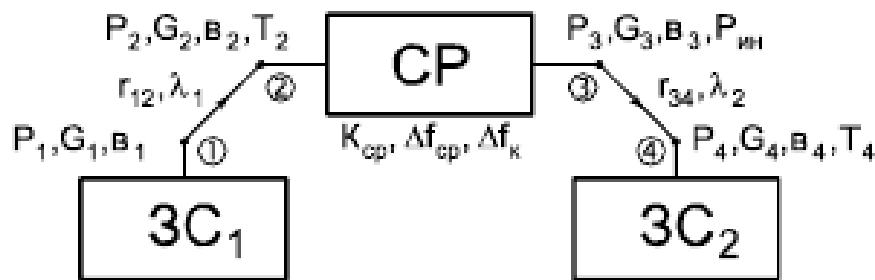


Рисунок 2.1 – Структура ССЗ РО

P_1, G_1, v_1 - відповідно потужність передавача, підсилення передавальної антени та втрати у фідері ЗС₁;

P_2, G_2, v_2, T_2 – відповідно потужність сигналу на вході СР, підсилення приймальної антени і втрати в антенному фідері СР, шумова температура СР;

$P_3, G_3, v_3, T_{ин}$ – відповідно потужність сигналу на виході СР, підсилення передавальної антени та втрати у фідері СР, потужність інтермодуляційної перешкоди на виході СР;

P_4, G_4, v_4, T_4 – відповідно потужність сигналу на вході приймача ЗС₂, підсилення приймальної антени ЗС₂, втрати в антенному фідері та шумова температура приймача ЗС₂;

K_{cp} , Δf_{cp} , Δf_k – відповідно коефіцієнт передачі СР за потужністю в лінійному режимі, ширина частотного діапазону СР і смуга пропускання одного каналу СР;

r_{12} , r_{34} , λ_1 , λ_2 – відповідно відстань між ЗС₁ і СР та СР-ЗС₂, робочі довжини хвиль передачі ЗС₁ та прийому ЗС₂.

Розглядається варіант, коли ССЗ РО складається з прямого та зворотного каналів зв'язку. Прямий канал включає радіолінії ЗС₁-СР і СР-ЗС₂, а зворотний - ЗС₂-СР і СР-ЗС₁. Для дуплексного зв'язку можливий незалежний розгляд кожного із згаданих каналів.

При енергетичному розрахунку прямого каналу необхідно одночасно з характеристиками радіоліній ЗС₁-СР і СР-ЗС₂ враховувати нелінійний характер обробки сигналів в СР.

Найскладніше забезпечити енергетичний баланс на ділянці СР-ЗС₂, оскільки потужність перешкоди P_p на вході приймача ЗС₂ визначається не тільки тепловими шумами ЗС₂ $P_{шзс}$, а й перевипромінюваними СР шумами ЗС₁ на вході СР $P_{шср}$ та інтермодуляційними перешкодами $P_{ін}$. При цьому результуюче відношення сигнал/перешкода g в ССЗ РО, що розглядається, може бути представлено наступним чином:

$$\frac{1}{g^2} = \frac{1}{g_{зс}^2} + \frac{1}{g_{ср}^2} + \frac{1}{g_{ін}^2}, g_{зс}^2 = \frac{P_4}{P_{шзс}}, g_{ср}^2 = \frac{P_2}{P_{шср}}, g_{ін}^2 = \frac{P_1}{P_{шін}}, \quad (2.9)$$

де $g_{зс}^2$, $g_{ср}^2$, $g_{ін}^2$ – відповідно відношення сигнал/шум за потужністю на вході ЗС₂, СР і відношення сигнал/інтермодуляційна завада на виході СР.

При використанні в ССЗ РО сигналів QPSK для забезпечення потрібного рівня достовірності передачі інформації необхідно, щоб відношення сигнал/завада за напругою g визначалося із співвідношення:

$$g = \text{arc}\Phi(1 - P_{пом}), \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, g^2 = \frac{P_c}{P_p}, \quad (2.10)$$

де $\text{arc}Z$ – зворотна функція від Z ; $\Phi(x)$ – інтеграл похибок; P_c – потужність сигналу; P_p – потужність завад, обумовлених шумами ЗС і СР.

Потужність шуму на вході ЗС₂ та СР

$$P_{\text{шзс}} = kT_4\Delta f_k, P_{\text{шср}} = kT_2\Delta f_k, k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}} \cdot \text{гр}; \Delta f_k = \frac{1,2R}{\log_2 M}, \quad (2.11)$$

де k - стала Больцмана; $M = 4$ - кратність маніпуляції сигналу QPSK.

Потужність сигналу на вході приймача СР

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \Delta_2}{B_1 B_2 L_{12}}, L_{12} = \left(\frac{4\pi r_{12}}{\lambda_1} \right)^2 \Delta L_{12}, \quad (2.12)$$

де Δ_2 - ослаблення підсилення приймальної антени СР за рахунок неточної орієнтації її осі симетрії у напрямку на ЗС₁; L_{12} - ослаблення сигналу на ділянці «ЗС-СР»; ΔL_{12} - додаткове ослаблення сигналу на ділянці «ЗС-СР» за рахунок неідеальності ефіру; λ_1 — робоча довжина хвилі передачі інформації ЗС₁.

Потужність сигналу на виході СР

$$P_3 = K_{\text{ср}} P_2. \quad (2.13)$$

При функціонуванні СР у багатосигнальному режимі

$$P_3 = \frac{K_i P_M}{n}, n \leq \frac{\Delta f_{\text{ср}}}{\Delta f_k}, \quad (2.14)$$

де P_M - максимальна потужність на виході СР, що функціонує в багатосигнальному режимі, яка на 2 дБ менша максимальної потужності в односигнальному режимі; n – кількість сигналів на вході СР; K_i - зниження потужності на виході СР відносно максимальної для зменшення інтермодуляційних завад.

У разі, коли $n > 20$, існує оптимальне значення $K_i = K_{\text{ionm}} = 0,63$, коли $g_{\text{ін}}^2 \rightarrow 2g_{\text{ср}}^2$.

Для взаємопов'язаного вибору характеристик ЗС₁, ЗС₂ та СР можна використовувати ітеративну методику, що базується на використанні коефіцієнтів запасу [8-10]

$$a = \frac{g_{\text{срс}}^2}{g^2}; b = \frac{g_{\text{зс}}^2}{g^2}; a = \frac{b}{b-1}; a \in \{5 \dots 11\}; b \in \{1,1 \dots 1,3\}; \frac{1}{g_{\text{зс}}^2} = \frac{1}{g_{\text{ср}}^2} + \frac{1}{g_{\text{ср}}^2}. \quad (2.15)$$

де $g_{\text{срс}}^2$ – результуюче відношення сигнал/завада за потужністю на виході СР з урахуванням теплових шумів та інтермодуляційних завад. Якщо $n > 20$ $g_{\text{ін}}^2 = 2g_{\text{ср}}^2$, отримаємо $g_{\text{срс}}^2 = \frac{2}{3}g_{\text{ср}}^2$.

Отримані співвідношення дозволяють зробити розрахунок та оптимізацію енергетичних характеристик компонент прямого радіоканалу.

Для розрахунку енергетичних характеристик передавача ЗС₁ (P_1 , G_1) можна скористатися рівнянням радіопередачі радіолінії ЗС₁-СР, відповідно до якого маємо

$$g_{\text{ср}}^2 = \frac{P_2}{P_{\text{шср}}}. \quad (2.16)$$

Після перетворень отримуємо

$$\frac{G_4}{T_4} = \frac{380n_{\text{в3}}n_{\text{в4}}r_{\text{з4}}^2\Delta L_{\text{з4}}kRb[\text{arc}\Phi(1-P_{\text{пом}})]^2}{K_iP_MG_3\Delta_3\lambda_2^2\log_2M}, \quad (2.17)$$

Аналогічним чином можна виконати розрахунок енергетичних характеристик зворотного каналу.

При фіксованих параметрах СР і симетричному характері прямого і зворотного каналів, коли $r_{12} = r_{34}$, $\Delta L_{12} = \Delta L_{34}$, а також при $\lambda_1 \approx \lambda_2$ енергетичні параметри ЗС визначаються із співвідношень

$$P_{\text{пзс}} = P_1, G_{\text{зс}} = G_1 = G_4, P_{\text{прзс}} = P_4, T_{\text{зс}} = T_4, \quad (2.18)$$

де $P_{\text{ПЗС}}$ – потужність передавача ЗС; $P_{\text{прЗС}}$ – реальна чутливість приймача ЗС; $T_{\text{ЗС}}$ – шумова температура.

З урахуванням вищенаведених співвідношень пропускна здатність ССЗ РО при організації ряду паралельних каналів «точка-точка» визначається наступним чином

$$n_k = \frac{2K_i P_M G_3 \Delta_3 \lambda_2^2 \log_2 M}{380 B_3 B_4 r_{34}^2 \Delta L_{34} k R b [\text{arc}\Phi(1 - P_{\text{пом}})]^2 T_{\text{ЗС}}}, \quad (2.19)$$

де n_k – максимально допустима кількість дуплексних каналів ССЗ РО.

2.3 Висновки до розділу

Проаналізовано три варіанти розподілу ресурсів супутникових ретрансляторів: використання декількох СР, які працюють в різних частотних діапазонах; розподіл каналів для реалізації багатостанційного доступу в стволі; динамічний розподіл і надання каналів на основі методів розподілу запитів. Розподіл ресурсів кожного СР для першого варіанту можна здійснити шляхом використання ортогональних структур сигналів. Для забезпечення багатостанційного доступу використовується частотне, часове або кодове ущільнення. Методи розподілу пропускної здатності на основі запитів ділять на дві групи – комутації каналів для обробки телефонних повідомлень і комутації пакетів для обробки даних.

Виконано аналіз енергетичного балансу за критерієм високошвидкісного Інтернет-доступу з урахуванням фактичного використання п'яти типів радіоліній: радіолінії вгору «Земля-Космос» (З-К) типу ЗС-СР, ЦЗС-СР; радіолінії вниз "Космос-Земля" (К-З) типу СР-ЗС, СР-ЦЗС і радіолінії "Космос-Космос" (К-К) типу СР-СР. Найбільш напруженими в енергетичному відношенні є радіолінії ЗС-СР і СР-ЗС у зв'язку з тенденцією переходу в ССЗ для рухомих об'єктів від мобільних земних терміналів до «ручних», тобто до суттєвого зниження потужності передавача ЗС.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ССЗ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ

Основна особливість супутникових ліній - наявність великих втрат сигналу, зумовлених згасанням його енергії на трасах великої фізичної довжини. Так, при висоті орбіти ШСЗ, що дорівнює 36 тис. км, згасання сигналу може досягати 200 дБ. Крім цього основного згасання в просторі, сигнал у лініях супутникового зв'язку схильний до впливу великої кількості інших факторів. Мова йде про поглинання в атмосфері, рефракцію, вплив дощових опадів тощо. З іншого боку, на приймальній пристрій супутника і земної станції крім власних флуктуаційних шумів впливають різного роду перешкоди у вигляді випромінювання космосу, Сонця і планет. У цих умовах правильний і точний облік впливу всіх факторів дозволяє здійснити оптимальне проектування системи, забезпечити її впевнену роботу в найважчих умовах і в той же час виключити зайві енергетичні запаси, що призводять до невикористаного збільшення складності земної та бортової апаратури [11, 12].

Норми на деякі якісні показники супутникових каналів (наприклад, відношення сигнал/шум) мають статистичний характер. Це змушує оцінювати збудники також статистично, тобто при розрахунках приймати до уваги не тільки кількісну міру впливу того чи іншого чинника, а й ймовірність (частоту) його появи. Необхідно враховувати характер і кількість сигналів, що передаються, а також характер їх перетворення (обробки) у супутниковому ретрансляторі. При передачі телефонних сигналів з багатостанційним доступом через бортовий ретранслятор проходить кілька сигналів, розділених за частотою, часом або формою і вони взаємно впливають один на одного, що має враховуватися під час розрахунку енергетики супутникових ліній [13].

3.1 Розрахунок пропускної здатності та складання плану частот

3.1.1 Вибір діапазону частот, ослаблення в дощі та урахування шумів космічних джерел

Оскільки антена ЗС спрямована в космос, то її шумова температура залежить від шумового випромінювання космосу та атмосфери. Ця шумова температура враховується під час вибору діапазону частот. Також враховують ослаблення сигналу в атмосфері та гідрометеорах. Поглинання радіохвиль у спокійній атмосфері (без дощу) значно нижче, ніж за наявності опадів. Гідрометеори в тропосфері (краплі дощу та туману, сніг тощо) розсіюють енергію радіохвиль, довжина хвилі яких сумірна з розмірами гідрометеорів. Послаблення сигналу в залежності від інтенсивності дощу J для різних частот різне.

Для ССЗ множник ослаблення в дощі дорівнюватиме:

$$V_d = L_d \cdot R_e, \quad (3.1)$$

де R_e - довжина траси, де йде дощ [км]; L_d – ослаблення сигналу в дощі [дБ].

Множник ослаблення показує, на скільки сигнал ослабне у дощі.

При горизонтальній поляризації антени, краплі дощу розщепляються, і ослаблення сигналу зростає в порівнянні з вертикальною поляризацією в 1,15 разів. Крім того, необхідно враховувати ефективні температури шумів космічних джерел на вході антени ЗС. У цілому за умови урахування ослаблень в гідрометеорах і шумів космічних джерел для ССЗ найбільше підходить діапазон частот від 1 ГГц до 10 ГГц. Таким чином, частота $f = 6$ ГГц використовується на ділянці земля-космос, а $f = 4$ ГГц - космос-земля.

Оскільки діапазон від 1 ГГц до 6 ГГц в даний час зайнятий, а нові ССЗ продовжують створювати, то стали використовувати діапазон 14/11 ГГц та 30/20 ГГц. Втрати сигналів при поширенні в цих більш високочастотних діапазонах зростають і стає складніше створювати та експлуатувати апаратуру.

Але при цьому коефіцієнт підсилення антен зростає, якщо їх розміри залишаються незмінними. Це дозволяє частково компенсувати втрати.

3.1.2 Запізнення сигналів при їх поширенні та виникнення відлуння

Час поширення сигналу в ССЗ визначається довжиною шляху L_c .

$$L_c > 2 \cdot H_{\text{ШСЗ}}, \quad (3.2)$$

де $H_{\text{ШСЗ}}$ – висота орбіти супутника.

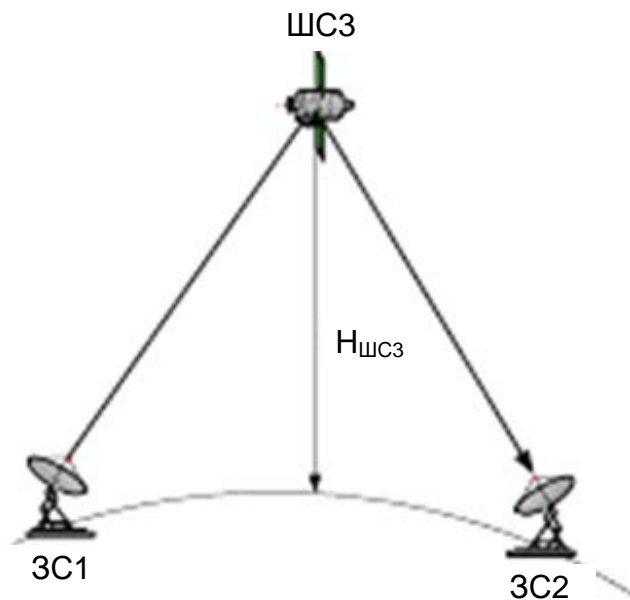


Рисунок 3.1 – Траса поширення сигналу від ЗС1 до ЗС2

Шлях, яким поширюється сигнал в ССЗ, показаний на рис. 3.1.

Час поширення сигналу, що випромінюється антеною земної станції, дорівнює [13, 14]:

$$t_{\text{пош}} = \frac{L_c}{c}. \quad (3.3)$$

Для геостаціонарного супутника

$$t_{\text{пош}} = \frac{2 \cdot 36 \cdot 10^3 \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 240 \text{ мс.}$$

При передачі телевізійних сигналів таке запізнення не має значення. При дуплексному зв'язку абонент чекатиме подвійну тривалість.

$$t_{\text{оч}} = 2 \cdot t_{\text{пош}} \approx (500 \dots 600) \text{ мс.}$$

При розмові через супутник виникають паузи, і порушується натуральність мови.

В апаратурі приймача ЗС частина прийнятого сигналу просочується в передавальну апаратуру, тобто сигнал повертається абоненту, який розмовляє, із запізненням на час поширення сигналу, і сприймається як відлуння. Для усунення впливу сигналу відлуння включають луноозагороджувачі. При часі поширення 500 мс створюють лунозагороджувачі, у яких цей сигнал послаблюється на 60 дБ.

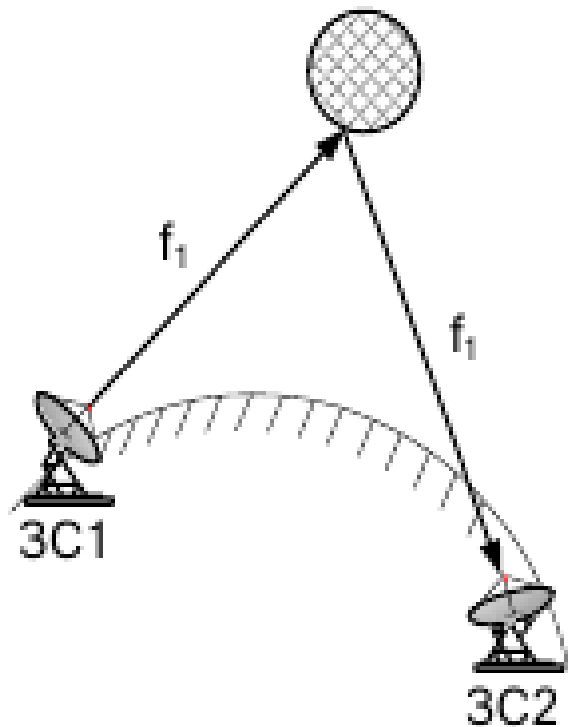


Рисунок 3.2 – Пасивний ретранслятор

Ретранслятори на ШСЗ можуть бути як пасивними, так і активними. Як пасивний ретранслятор можуть бути планети, метеорити та гідрометеори,

рисунок 3.2. Пасивні ретранслятори в даний час не застосовують, тому що прийнятий сигнал буде дуже слабким.

Сигнал, що перевипромінюється після підсилення в активному ретрансляторі буде достатнього рівня для його прийому на ЗС. Такі ретранслятори називають ретрансляторами прямого підсилення, рисунок 3.3. Перевипромінений сигнал, після підсилення в такому активному ретрансляторі, (тобто на ШСЗ) на проміжній частоті зміщується на (1,5... 2) ГГц.

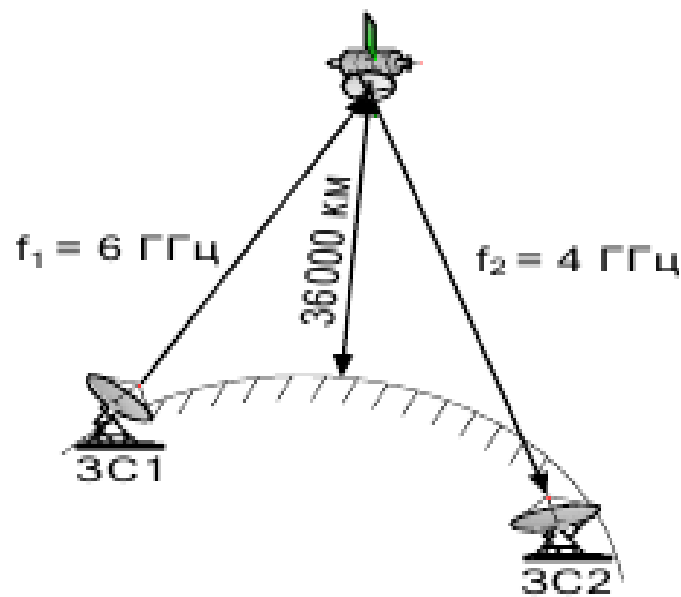


Рисунок 3.3 – Активний ретранслятор

3.1.3 Методи багатостанційного доступу

Багатостанційний доступ (БД) дозволяє працювати через один ШСЗ усім ЗС, розташованим у зоні обслуговування, як складової частини зони покриття. На ШСЗ є одна приймально-передавальна антена для роботи з усіма ЗС.

Використовують системи багатостанційного доступу з кодовим розділенням (БДКР), з частотним розділенням (БДЧР) та часовим розділенням (БДЧсР). БДКР реалізують на основі використання шумоподібних сигналів (ШПС) і він є найперспективнішим для сучасних ССЗ. При БДЧР смугу пропускання частот ретранслятора, тобто ШСЗ $\Delta f_{\text{шсз}}$ ділять між усіма ЗС, кількість яких позначають $N_{\text{зс}}$.

Приклад розподілу смуги частот при БДЧР показано на рисунку 3.4.

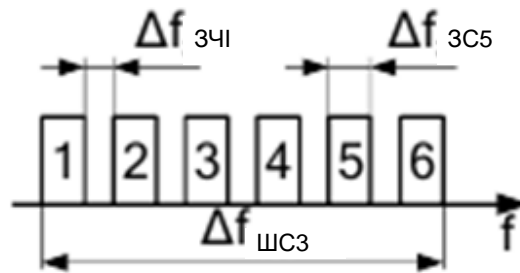


Рисунок 3.4 – Приклад розподілу смуги пропускання частот ретранслятора $\Delta f_{\text{шсз}}$ між ЗС при БДЧР

Кожній ЗС виділяється відповідна смуга частот $\Delta f_{\text{зсп}}$. Смуги частот, виділені ЗС, відокремлені одна від одної захисними частотними інтервалами (ЗЧІ) $\Delta f_{\text{зчі}}$, які необхідні для усунення перехідних перешкод між сигналами у сусідніх частотних смугах ЗС. Перехідні перешкоди виникають при одночасному проходженні сигналів усіх ЗС через нелінійний передавач ретранслятора на ШСЗ.

На нелінійній ділянці характеристики передавача створюються перехідні перешкоди, тобто гармоніки, які потрапляють у смуги пропускання інших ЗС. Тому і вводять ЗЧІ, але це зменшує пропускну здатність ретранслятора, тобто знижує ефективність використання його смуги частот $\Delta f_{\text{шсз}}$.

При БДЧР на вході приймача ШСЗ необхідно підтримувати рівні потужностей всіх сигналів ЗС, що приймаються, однаковими з точністю до 0,5 дБ. Це необхідно для того, щоб не виникало придушення слабкого сигналу сильним, при проходженні через нелінійний передавач ШСЗ [10, 14].

Хоча рівні сигналів всіх передавачів ЗС і однакові, але умови поширення сигналів від ЗС до ШСЗ різні. Крім того, шлях у сигналів від ЗС до ШСЗ різний. Для підтримки рівності потужностей сигналів на вході приймача ШСЗ, на кожній ЗС вимірюють ослаблення сигналу на ділянці ЗС-ШСЗ, а потім автоматично регулюють вихідну потужність передавача ЗС до необхідного рівня.

На один телефонний канал виділяється одна несуща частота. Такі канали називають ОКН («один канал на несущу»). Наприклад, якщо швидкість передачі інформації $R = 64$ кбіт/с, і якщо в приймачі використовується цифрова модуляція ІКМ-ВФМ (імпульсно-кодова модуляція і відносно-фазова модуляція) з чотирма рівнями квантування, то необхідно виділити на один телефонний канал (ТФ) смугу частот $\Delta f_{mk} = 45$ кГц, причому вже враховується і ЗЧІ.

Припустимо, що кожен частотний стовбур ретранслятора (транспондер) має смугу пропускання частот $\Delta f_{cm} = 36$ МГц, то тоді в ньому можна буде розмістити телефонних каналів у кількості

$$N_{\text{ТК}} = \frac{36 \cdot 10^3}{45} = 800.$$

тобто в такому частотному стволі можна розмістити всього 800 телефонних каналів, кожен із яких займає смугу частот $\Delta f_{mk} = 45$ кГц.

3.2 Підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності в каналі передачі даних

3.2.1 Гранично досяжні швидкості передачі даних

Визначимо гранично досяжні швидкості передачі даних на лінії зв'язку КА-НСС (космічний апарат – наземна станція стеження), які у свою чергу залежать від співвідношення сигнал/шум на вході приймача. Для цього скористаємося основним рівнянням радіозв'язку

$$P_r = \lambda^2 P_t G_t G_r / (4\pi \cdot d)^2, \quad (3.4)$$

де λ – довжина хвилі, d – відстань від бортового передавача до НСС, G_t і G_r – відповідно коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен, P_t і P_r –

відповідно потужності на виході передавача та вході приймача. Коефіцієнти підсилення антен визначаються виразом:

$$G = (4\pi/\lambda^2) \cdot S_A v \eta, \quad (3.5)$$

де S_A - геометрична площа розкриття антени, що визначається через діаметр антени (D) $S_A = \pi D^2/4$, v і η – відповідно, коефіцієнт використання поверхні та ККД (відношення потужності радіовипромінювання, створюваного антеною, до потужності радіочастотного сигналу, що підводиться до антени). При $\lambda = 2$ см (несуча частота 15 ГГц), діаметрах передавальної та прийомної антен, рівних відповідно 2 і 22 м, v і η , відповідно рівних 0.5 та 0.95, коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен складуть 52.25 та 67 дБ, відповідно [15].

При максимальній відстані до точки стояння КА (т. Лагранжа L2) $d = 1.75$ млн км [2], потужності на виході передавача 200 Вт, потужність сигналу на вході приймача НСС (P_r) складе близько $4.4 \cdot 10^{-11}$ Вт. При ширині смуги каналу зв'язку (Δf), що дорівнює 500 МГц, потужність гаусового шуму на вході приймача (P_{noise}), при узгодженні виходу антени з входом приймача відповідно з (3.6) становитиме $6.9 \cdot 10^{-13}$ Вт.

$$P_{noise} = kT\Delta f K_{noise}, \quad (3.6)$$

де k – постійна Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К), T – шумова температура приймача в градусах Кельвіна, K_{noise} – коефіцієнт шуму приймача. T та K_{noise} у (3.6) прийняті рівними відповідно 50 К і 3 дБ.

При цьому відношення сигнал/шум (ВСШ) на вході приймача складе близько 18 дБ, що впливає з виразу (3.7).

$$\gamma = 10 \cdot \lg (P_r/P_{noise}). \quad (3.7)$$

Гранично допустимі швидкості передачі даних в залежності від ВСШ на вході приймача визначаються відповідно до теорії Шеннона-Хартлі [13-15] про пропускну здатність каналу зв'язку (C), відповідно до виразу

$$C = \Delta f \cdot \log_2(1 + \gamma) \text{ біт/с.} \quad (3.8)$$

На рис. 3.5 представлена залежність C від γ при смузі пропускання каналу $\Delta f = 500$ МГц.

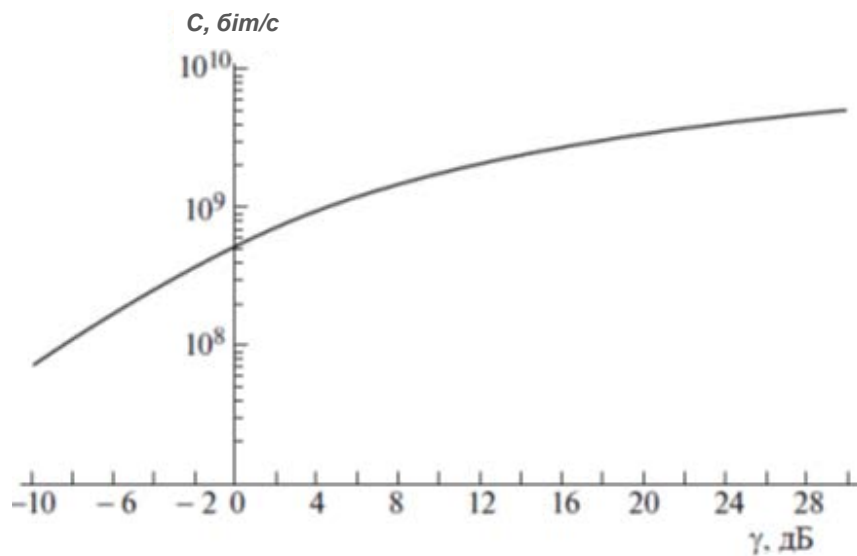


Рисунок 3.5 – Залежність пропускну здатності каналу зв'язку від відношення сигнал/шум для каналу 500 МГц

З урахуванням необхідного енергетичного запасу у 3 дБ визначимо ВСШ на вході приймача 15 дБ. Відповідно до (3.8) та рис. 3.5 гранично допустима пропускну здатність каналу зв'язку при заданому ВСШ та смузі каналу зв'язку 500 МГц складе 2.514 Гбіт/с, нормована пропускну здатність (спектральна ефективність) ($C/\Delta f$) при цьому становитиме 5.028 біт/с/Гц. Слід зауважити, що зазначена пропускну здатність є гранично досяжною при заданому ВСШ. Сигнали зі швидкістю до 2.514 Гбіт/с, при значенні ВСШ 15 дБ, теоретично можна передати зі скільки завгодно малою ймовірністю помилки, застосовуючи складні методи модуляції та завадостійкого кодування [14]. У реальних системах бездротових комунікацій дані передаються з кінцевою, відмінною від

нуля, ймовірністю помилки та швидкість їх передачі завжди нижче пропускної спроможності каналу.

Залежно від здатності виправлення помилок на виході демодулятора приймача коди поділяються на коди з "дуже поганою", "поганою" і "хорошою" кодовою відстанню. Кодова "відстань" являє собою мінімальну "відстань" (міру відмінності) між кодовими векторами найближчих дозволених кодових комбінацій [6]. Мінімальна "відстань" визначає виправну здатність коду, чим вона більша, тим більша кількість помилок, що виникають, даний код здатний виправити.

До кодів з "дуже поганою" кодовою відстанню відносяться всі лінійні алгебраїчні та згорткові коди, кодова відстань яких залишається незмінною зі збільшенням довжини коду [16].

До кодів з "поганою" кодовою відстанню відносяться конструкції з декількох простих кодів та складені коди, кодова відстань яких збільшується зі збільшенням довжини коду, але виправна їх здатність падає, оскільки при необмеженому зростанні довжини коду відношення кодової відстані до його довжини прямує до нуля.

До кодів з "хорошою" кодовою відстанню відносяться лінійні випадкові коди, що декодуються методом максимуму апостеріорної ймовірності. Для цього типу кодів забезпечується зростання кодової відстані зі збільшенням довжини коду, та його виправна здатність підвищується, оскільки при необмеженому зростанні довжини коду відношення кодової відстані до його довжини прямує до константи, значення якої залежить від типу коду. Яскравими прикладами випадкових кодів є турбо-коди [15] та коди низької щільності з контролем перевірок на парність. Випадкові коди здатні практично впритул наблизитися до максимально досяжних значень швидкостей передачі даних, забезпечуючи при цьому малу ймовірність помилки [10].

3.2.2 Пропускна здатність каналів зв'язку з застосуванням спектрально ефективних методів модуляції

Для забезпечення швидкості передачі даних при заданому (15 дБ) значенні ВСШ доцільно застосовувати спектрально ефективні методи модуляції при відносно високій завадостійкості переданих даних, наприклад, для забезпечення спектральної ефективності 5 біт/с/Гц можна застосувати квадратурну амплітудну модуляцію 32-QAM. Даний вид модуляції поряд з високою спектральною ефективністю порівняно з рівноцінним за спектральною ефективністю фазоманіпульованим сигналом PM-32 (Phase Modulation) має високу завадостійкість, рисунок 3.6.

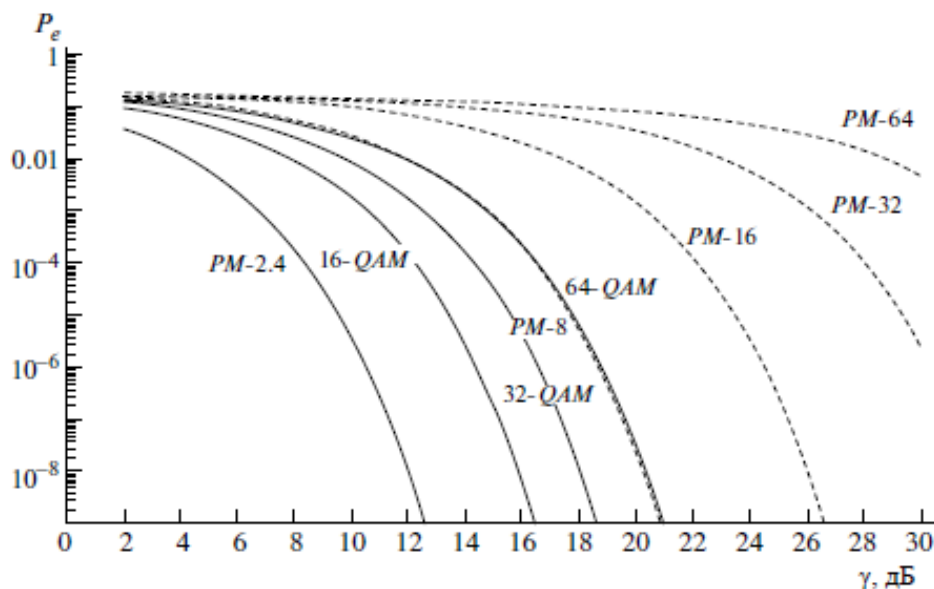


Рисунок 3.6 – Ймовірності бітової помилки когерентного прийому фазоманіпульованих сигналів (PM) з постійною обвідною (пунктир) та спектрально ефективних сигналів КАМ

Сигнали модуляції 32-QAM при спектральній ефективності 5 біт/с/Гц забезпечують швидкість передачі даних 2.5 Гбіт/с у смузі частот 500 МГц, що майже відповідає гранично досяжній швидкості передачі даних (3.8).

Визначимо завадостійкість радіолінії через ймовірність помилкового прийому даних на біт. У представленому каналі зв'язку буде присутній гаусовий тепловий шум, потужність якого визначається відповідно до (3.6).

Даний канал відноситься до каналів з “хорошими” характеристиками, у яких відсутні як повільні релеївські, так і швидкі або частотно-селективні замирання, які суттєво знижують смугу когерентності каналу та викликають значну міжсимвольну інтерференцію при прийомі сигналів. Наведемо вирази, що характеризують ймовірність помилкового когерентного прийому даних сигналів *PM* та *QAM* [5, 11]

$$P_{c_PM} = (1/M) \cdot \operatorname{erfc}[\sqrt{\gamma} \cdot \sin(\pi/N)], \quad (3.9)$$

$$P_{c_QAM} = \left[\frac{(1 - 1/\sqrt{N})}{\log_2(\sqrt{N})} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\sqrt{3\gamma \log_2(\sqrt{N}) / (N - 1)} \right], \quad (3.10)$$

де N – кількість точок сигнального сузір'я, $M = \log_2(\sqrt{N})$,

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$ – додаток функції помилок.

Необхідно звернути увагу, що завадостійкість фазоманіпульованого сигналу *PM-8* практично збігається з завадостійкістю сигналу з квадратурною амплітудною модуляцією *64-QAM*, рис. 3.6, хоча спектральна ефективність останнього вдвічі вище першого, і становлять відповідно 3 та 6 біт/с/Гц.

Запропонована до застосування відповідно з пропускнуою здатністю (15 дБ) модуляція *32-QAM* енергетично більш ефективна відносно сигналу модуляції *PM-8*. Наприклад, ймовірність помилки 10^{-5} забезпечується модуляцією *32-QAM* при значенні ВСШ приблизно на 2 дБ менше, ніж аналогічна ймовірність помилки при модуляції *PM-8*, рис. 3.6. Спектральна ефективність сигналів з модуляціями *PM-8* і *32-QAM* складе відповідно 3 та 5 біт/с/Гц. Слід зазначити, що спектральна ефективність 3, 5 та 6 біт/с/Гц для представлених видів модуляції отримана при фільтрації ідеальним прямокутним фільтром Найквіста з нульовим коефіцієнтом заокруглення, що фізично не реалізується. Практичне використання зазначеного фільтра [13, 14], наприклад, з $\alpha = 0.25$ знизить спектральну ефективність 3, 5 і 6 біт/с/Гц до,

відповідно, 2.4, 4 і 4.8 біт/с/Гц, а швидкість передачі даних у каналі 500 МГц - до 1.2, 2 і 2.4 Гбіт/с.

Відсутність постійної обвідної в сигналах з квадратурною амплітудною модуляцією N-QAM ($N = 16, 32, 64, 128, 256 \dots 2n$) є серйозним недоліком, оскільки, у цьому випадку, у передавачі для неспотвореної передачі сигнальних сузір'їв необхідно використовувати лінійний підсилювач потужності (ПП) з великим динамічним діапазоном, і, відповідно, з низьким ККД. Сучасні методи підвищення лінійності вихідних ПП забезпечують ефективне застосування потужних нелінійних ПП з високим ККД в лінійних підсилювальних системах. При цьому втрати від використання нелінійних ПП у схемах лінеаризації становлять 0.5-0.7 дБ.

Для зниження ймовірності помилкового прийому сигналів доцільно застосувати завадостійкий випадковий лінійний розширений евклідово-геометричний (EG) код LDPC (EG-LDPC) з ітеративним SPA (Sum-Product Algorithm) декодуванням. Параметри коду (524256, 507873) складають відповідно інформаційну та загальну довжину кодового слова. При цьому швидкість коду становитиме 0.967. Зазначений код забезпечує мінімальну надмірність при високій виправній здатності.

3.2.3 Пропускна здатність каналу зв'язку для технології з ортогональним частотним розділенням сигналів

Останнім часом у системах бездротової передачі даних істотно зросла частка пристроїв, які функціонують за технологією ортогонального частотного розділення сигналів (OFDM-Orthogonal Frequency Divide Multiple). Дані при цьому передаються символами, що складаються з набору гармонічних сигналів певних частот (піднесущих) ортогональних один до одного. Ортогональність забезпечується тим, що протягом символного періоду гармонічні сигнали мають ціле число півперіодів, а їхня відмінність від сусідніх сигналів становить період. При цьому вихідні дані повністю ортогональні (3.11)

$$a(t) = \begin{cases} \int_0^T \cos(\omega t + \varphi_1) \cos\left[\left(\omega + \frac{2\pi}{T}\right) \cdot t + \varphi_2\right] dt = \\ = 0,5 \int_0^T \left\{ \cos\left(\varphi_1 - \varphi_2 - 2\pi \frac{t}{T}\right) + \cos\left[\left(2\omega + \frac{2\pi}{T}\right) t + \varphi_1 + \varphi_2\right] \right\} dt = 0 \\ \int_0^T \cos^2(\omega t + \varphi_1) dt = 0,5 \int_0^T [1 + \cos(2\omega t + 2 \cdot \varphi_1)] dt = T/2. \end{cases} \quad (3.11)$$

де T – інтервал ортогональності, ω , φ_1 , φ_2 – частота, початкові фази гармонійних сигналів. Як витікає з (3.11), ортогональність не залежить від початкових фаз сигналів. Під час інтервалу ортогональності, який становить довжину символу, фази сигналів не змінюються, зміна фаз при модуляції ортогональних піднесущих відбувається в момент переходу від одного символу до іншого.

У частотній області сигнали OFDM являються сумою спектрів сигналів ортогональних піднесущих, спектри яких у свою чергу щільно упаковані, взаємно перекриваючись один з одним. При цьому міжканальна частотна інтерференція від окремих піднесущих не впливає на інші, рис. 3.7.

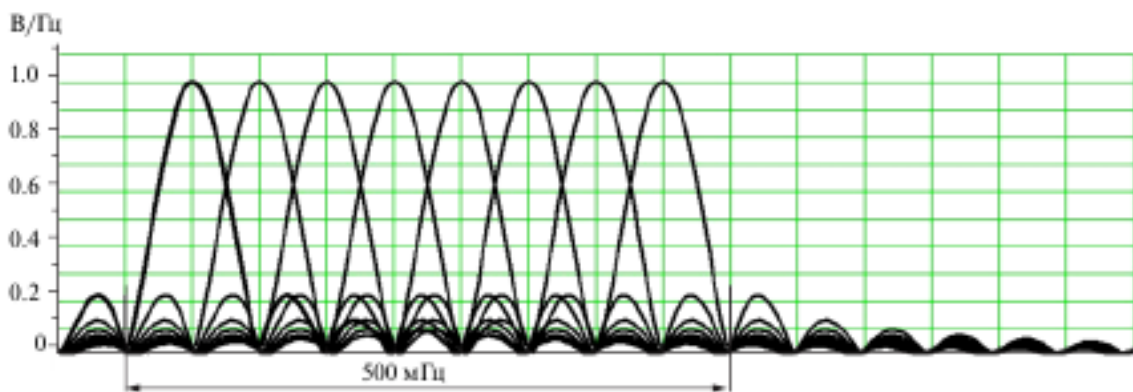


Рисунок 3.7 – Фрагмент модулів спектральної щільності напруги від восьми ортогональних піднесущих

Застосування сигналів OFDM забезпечує спектральну ефективність переданих даних, сумірну з фільтрацією радіосигналу ідеальним прямокутним фільтром Найквіста. Ця технологія забезпечує максимально можливу спектральну ефективність передачі даних для заданого типу модуляції.

Формування піднесущих сигналу OFDM в каналі передачі даних здійснюється або застосуванням алгоритмів Фур'є-перетворення [10], або адитивним додаванням фазоманіпульованих сигналів, на ортогональних частотах з виходів підсилювача потужності. При цьому підсилення сигналів окремих гармонійних піднесущих із низьким динамічним діапазоном реалізують ПП з більш високим ККД, в той час як для підсилення сигналу OFDM з виходу фур'є-перетворювача потрібно розум з більш високим динамічним діапазоном, і, відповідно низьким ККД.

Додатковими перевагами технології OFDM є можливість ефективно функціонувати в каналі з багатопроменевістю, коли смуга когерентності каналу набагато менше смуги сигналу. При цьому смуга субканалу окремої піднесущої в 2^n разів менше смуги сигналу. І, очевидно, у цій невеликій смузі простіше забезпечити когерентність [10]. У розглянутому варіанті передачі даних з борту КА на НСС, внаслідок застосування вузькоспрямованих антен з великим коефіцієнтом підсилення, багатопроменевість малоймовірна, за винятком часу роботи антени при малих кутах місця. В цілому канал передачі даних на лінії КА-НСС можна вважати каналом з "хорошими характеристиками. Однак, поряд зі збільшенням спектральної ефективності, застосування технології OFDM дозволяє зберегти достовірність передачі даних при зниженні смуги когерентності в ПП передавача, внаслідок його деградації в період експлуатації. Все це зумовило прийняття відповідних рекомендацій МСЕ-R стосовно супутникових систем.

3.2.4 Підвищення пропускної здатності каналу зв'язку застосуванням ВЧ-сигналів міліметрового діапазону радіохвиль

Як було показано вище, смуга частот сигналу лінійно пов'язана з пропускною здатністю каналу зв'язку (3.7). Виходячи з цього, для суттєвого підвищення останньої необхідно прагнути до максимально можливого розширення смуги частот каналу зв'язку. У свою чергу, збільшення смуги

каналу зв'язку тісно пов'язано з використанням електромагнітного спектра радіохвиль.

Відповідно до регламенту радіозв'язку частотний діапазон розписаний аж до 275 ГГц [9, 10]. Найбільш щільно частоти зайняті в низькочастотному діапазоні аж до міліметрового діапазону. Однак, якщо в метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах електромагнітного спектру радіохвиль всі смуги частот в основному розподілені і практично не залишилось вільних діапазонів, то в міліметровій малоосвоєній частини спектра є відносно вільні ділянки частотних смуг.

В міліметровому діапазоні радіохвиль привабливо виглядає E-діапазон з частотами 71-76 та 81-86 ГГц. Якщо у вказаному частотному діапазоні (71–76 і 81-86 ГГц), що має ширину 12 ГГц виділити з урахуванням реальних параметрів фільтра Найквіста смугу 10 ГГц для передачі даних у симплексному режимі, тобто використовувати виділену смугу частот для передачі даних тільки в одному напрямку, від передавача до приймача, то пропускна спроможність каналу зв'язку виглядатиме, як показано на рис. 3.8.

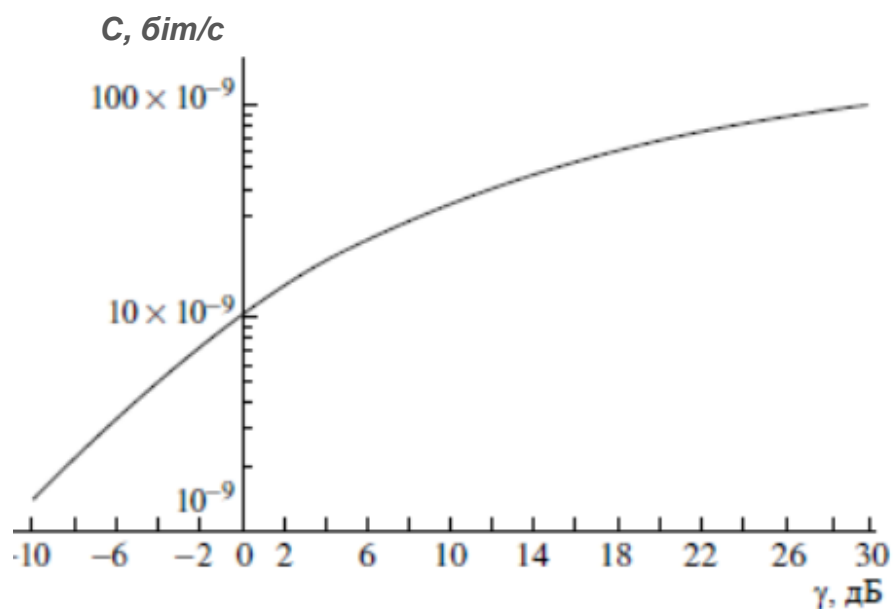


Рисунок 3.8 – Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення сигнал/шум для смуги каналу 10 ГГц

Використовуючи основне рівняння радіозв'язку (3.4), змінивши довжину хвилі (4 мм) та діаметр приймальної антени (15 м) визначимо потужність

радіосигналу на вході приймача ($5.11 \cdot 10^{-10}$ Вт). Потужність шуму визначиться з формули (3.6) ($1.38 \cdot 10^{-11}$ Вт), а значення ВСШ із виразу (3.7) (15.69 дБ). При цьому потужність сигналу на вході приймача, порівняно з довжиною хвилі 2 см, зросла, але також виросла і потужність шуму. Перше збільшення пояснюється підвищенням коефіцієнта підсилення приймально-передавальних антен, друге - різким зростанням смуги частот каналу зв'язку. З урахуванням необхідного енергозапасу в 3 дБ величина ВСШ на вході приймача знизиться до 12.7 дБ.

Оскільки сигнал поширюється, у тому числі в нижньому шарі атмосфери, тропосфері, то необхідно враховувати виникаючі при цьому втрати від водяної пари, які зростають із збільшенням частоти сигналу. Відповідно до рекомендацій сектора радіозв'язку Рекомендація МСЕ-R Р. 676-10 від 09/2013 щодо згасання радіосигналу в атмосферних газах [10], зенітне згасання радіосигналу на частоті 70-80 ГГц (при відсутності гідрометеорів) складе приблизно 0.85 дБ при товщині тропосфери 10 км (у помірних широтах вона лежить в діапазоні від 10 до 12 км). На рисунку 3.9 показана зміна довжини шляху радіосигналу по тропосфері залежно від кута місця антени.

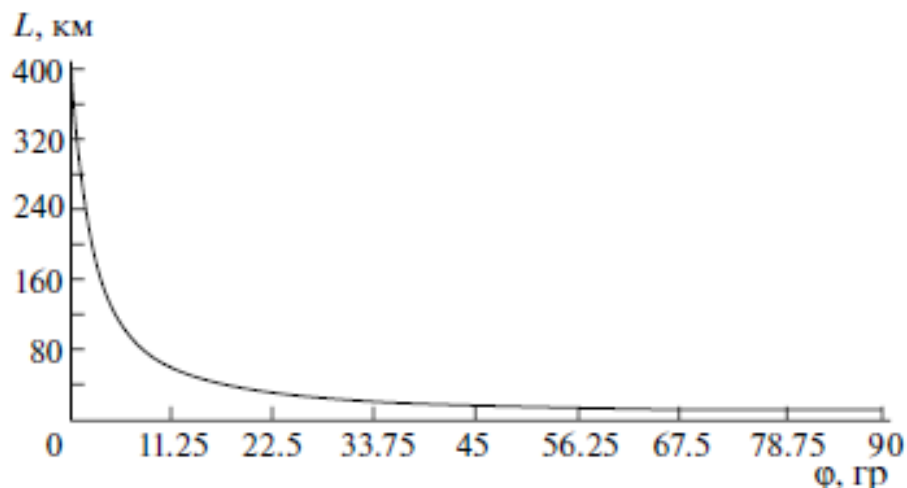


Рисунок 3.9 – Залежність довжини траси радіосигналу по тропосфері від кута місця антени

Зазначена залежність визначена з наступного виразу з теореми косинусів

$$L = R_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) + \sqrt{R_3^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) - R_3^2 + (R_3 + h)^2}, \quad (3.12)$$

де R_3 - радіус Землі, дорівнює 6400 км, h – товщина тропосфери, φ – кут місця антени (кут нахилу до горизонту). Тут прийнято деяке допущення, що Земля має форму кулі.

З рисунку 3.9 та формули (3.12) випливає, що при $\varphi = 17.3^\circ$ $L = 40$ км, при $\varphi = 23.5^\circ$ $L = 30$ км, а при $\varphi = 37^\circ$ $L = 20$ км. При максимальній довжині траси (40 км) при мінімально представленому куті місця (17.3°) ослаблення сигналу складе $(0.85 \text{ дБ}/10\text{км}) \cdot 40 \text{ км} = 3.4 \text{ дБ}$. У результаті значення ВСШ на вході приймача становитиме $12.69 - 3.4 = 9.29 \text{ дБ}$.

Слід також враховувати, що радіосигнали міліметрового та субміліметрового діапазонів при поширенні в турбулентній тропосфері мають флуктуації амплітуди, що описуються логнормальним розподілом [20]. При цьому слід мати на увазі, що щільність ймовірності ЗШС сигналів міліметрового діапазону також описується логнормальним законом, а його дисперсія, поряд з довжиною хвилі, залежить від дальності поширення по тропосфері. Тому залежно від кута місця антени і відповідно дальності розповсюдження потрібен додатковий енергозапас від 1 до 3 дБ, причому встановлювати антену на кут місця менше 15° недоцільно.

З урахуванням вищевикладеного значення ВСШ на вході приймача визначимо 7.3 дБ. При цьому значенні ВСШ пропускну здатність каналу зв'язку визначиться з урахуванням (3.8) та рис. 3.8 значенням 26.7 Гбіт/с при смузі каналу зв'язку 10 ГГц.

Для передачі даних у поданому каналі доцільно застосувати QPSK (Quadrature Phase Shift Key) модуляцію сигналу, що забезпечує спектральну ефективність 2 біт/с/Гц, постійна обвідна цього сигналу дозволяє використати високоефективні нелінійні ПП з високим ККД.

Відповідно, у каналі зі смугою 10 ГГц при вказаному типі модуляції можлива реальна передача даних із швидкістю 20 Гбіт/с. Ймовірність помилки

прийому сигналу модуляції QPSK при ВСШ 7.3 дБ (рис. 3.6) становитиме $5.2 \cdot 10^{-4}$. Вищеописаний завадостійкий LDPC [10] випадковий код (рис. 3.7) значно знизить можливість помилки.

Аналогічні розрахунки міліметрового діапазону можуть бути виконані для довільної довжина хвилі. При цьому слід зауважити, що зменшення довжини хвилі з одного боку забезпечує підсилення сигналу приймально-передавальними антенами, з іншого боку, збільшення несущої частоти підвищує втрати потужності сигналу внаслідок згасання [10] і збільшує дисперсію логнормальної флуктуації амплітуди сигналу [11].

Передача даних у міліметровому діапазоні E (71-76; 81-86 ГГц) при смузі сигналу 10 ГГц в наш час реалізована. Відповідне обладнання дозволяє здійснювати симплексну передачу зі швидкістю до 20 Гбіт/с.

Основні переваги та недоліки кожного із трьох (ефективної модуляції, технології OFDM, використання мм діапазону радіохвиль) варіантів підвищення швидкості передачі даних зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця варіантів підвищення швидкості передачі даних

Методи підвищення швидкості передачі даних	Переваги методу	Недоліки методу
Ефективна модуляція	Висока спектральна ефективність передачі даних	Необхідність лінеаризації ПП. Алгоритмічна складність реалізації
Застосування технології OFDM	Максимально можлива спектральна ефективність для заданого типу модуляції. Гнучкість технології. Малий вплив смуги когерентності каналу зв'язку	Необхідність лінеаризації ПП. Алгоритмічна складність реалізації
Використання мм діапазону	Висока швидкість передачі даних	Технологічна складність реалізації

3.3 Висновки до розділу

Проведено аналіз робочого діапазону, впливу гідрометеорів та шумів космічних джерел на швидкість передачі даних по лінії КА-ЗС. Показано розподіл смуги частот супутникового ретранслятора для ЗС при реалізації багатостанційного доступу з частотним розділенням сигналів.

Визначено гранично досяжні швидкості передачі даних залежно від співвідношення сигнал/шум та розглянуто варіанти підвищення цієї швидкості.

Спектрально ефективні методи квадратурної амплітудної модуляції (QAM) у порівнянні з фазовою (PM) модуляцією суттєво виграють у завадостійкості. Наприклад, застосування модуляції 32-QAM спільно з завадостійким кодом дозволяє забезпечити спектральну ефективність передачі 4 біт/с/Гц (2 Гбіт/с у смузі 500 МГц).

Технологія ортогонального частотного ущільнення сигналів забезпечує максимально можливу спектральну ефективність передачі даних для заданого типу модуляції. Перевагою цієї технології є її гнучкість, яка дозволяє за необхідності передавати дані зі змінними швидкостями.

Застосування мм-діапазону забезпечує зростання швидкості передачі даних через збільшення смуги частот каналу зв'язку, яка на відміну від значення відношення сигнал/шум на вході приймача, лінійно збільшує пропускну здатність каналу.

В усіх трьох варіантах підвищення швидкості передачі даних для виправлення помилок, що виникають, доцільно застосовувати ефективне завадостійке кодування.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ССЗ

В даний час в галузі наземних безпроводних технологій відбувається суттєвий розвиток, тоді як розвиток супутникових технологій має нижчі темпи. До найважливіших наземних технологій слід віднести: мультиплексування з ортогональним поділом сигналів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), використання систем MIMO (Multiple Input - Multiple Output) і надширококузових сигналів UWB (Ultra Wideband) [16].

Зазвичай у супутникових системах зв'язку використовуються тільки добре вивчені та випробувані технології. Це пояснюється високою вартістю, неможливістю модернізації та ремонту супутникових систем та бажанням звести до мінімуму можливі ризики. Крім цього, ресурси бортового обладнання космічного апарату (потужність споживання, пам'ять, ступінь інтеграції тощо) занадто обмежені. В той же час кількість енергетичного та обчислювального ресурсів на супутнику вище, ніж у наземного мобільного терміналу. Отже, принципово існує можливість розширити на КА спектр сучасних технологій.

Таким чином, змодельємо ССЗ, яка використовує ефективні технології сучасних безпроводних систем, такі як OFDM, UWB та MIMO. Розглянемо особливості їх застосування.

4.1 Технологія MIMO

Якість передачі інформації та пропускну здатність в безпроводних системах можна значно підвищити за рахунок використання технології MIMO.

Відомо, що система MIMO характеризується такою структурою. Вона має у своєму складі M_t передавачів і передавальних антен та M_r приймачів і приймальних антен. На рисунку 4.1 наведено MIMO-систему $M_t \times M_r$. Демультіплексор розбиває високошвидкісний потік даних на M_t незалежних послідовностей, кожна з яких має швидкість $1/M_t$. Ці послідовності передаються одночасно з декількох антен, відповідно використовуючи лише

$1/M_t$ їх первинної смуги частот. На передавальному кінці лінії зв'язку відбувається перетворення послідовного потоку в паралельний, а в приймальному – зворотне перетворення.

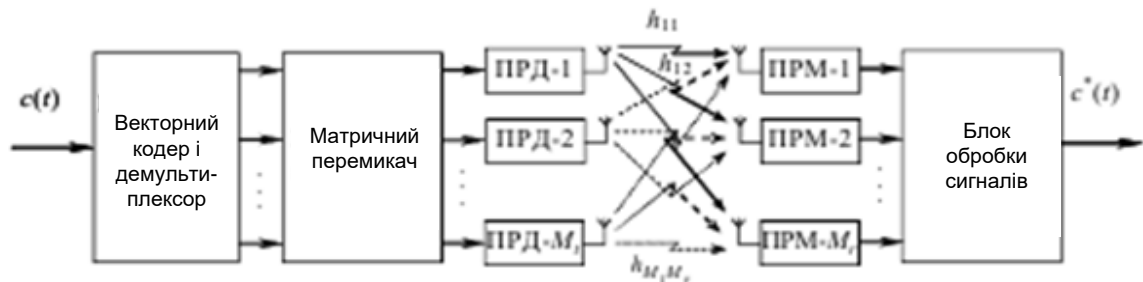


Рисунок 4.1 – Структурна схема МІМО

Таким чином, у системах МІМО працює множина виходів (передавальних антен), сигнали з яких приймаються як множина потоків на кілька приймальних антен, рознесених у просторі.

Засоби радіозв'язку МІМО забезпечують:

- згладжування у зоні покриття мертвих зон та її розширення;
- підвищення вірогідності роботи на трасах, де спостерігається менший вплив завмирань, завдяки використанню декількох незалежних шляхів поширення сигналу;
- фактичне підвищення швидкості передачі за рахунок формування фізично різних каналів.

Виникає питання вибору виду МІМО-технологій, які могли б бути найбільш раціонально застосовані в супутникових системах зв'язку. Очевидно, слід враховувати для ССЗ: зону покриття, топологію каналу зв'язку, рівень перешкод, величину затримки поширення сигналу у каналі. Також супутникові системи розрізняють за смугою частот, що використовується (див. табл. 4.1), чисельності групи кінцевих користувачів, схеми мультиплексування тощо.

Виходячи з особливостей ССЗ найбільш перспективними варіантами використання МІМО у них можуть бути:

- використання одного або двох супутників для схема передачі, розрахованої на одного користувача;

- використання одного супутника для схеми передачі, розрахованої на багато користувачів.

Таблиця 4.1 – Діапазони частот ССЗ

Позначення діапазону	UHF	L	S	C	X	Ku	Ka
Смуга частот, ГГц	0.3-3	1-2	2-4	4-8	8-12	12-18	26-40

Зрозуміло, що для повного використання переваг рознесення та мультиплексування у першому випадку у середовищі повинна бути велика кількість розсіювачів для більшої незалежності просторових шляхів поширення сигналів між багатоантенним приймачем та передавачем. В протилежному випадку ранг матриці каналу зменшується до рівня SISO системи. На частоті вище 10 ГГц, де є вимога прямої видимості між супутником і наземною станцією, спостерігається сильна просторова кореляція сигналів, що передаються, а також через обмеження простору на борту супутника. Тобто супутник не може забезпечити необхідне просторове рознесення антен для ефективної роботи системи MIMO. Тобто у разі однокористувальницької схеми передачі з одним супутником можлива побудова несиметричного SIMO, де множина антен реалізована виключно в наземному сегменті шляхом рознесення антен наземних станцій на необхідні відстані.

Якщо використати орбітальне рознесення, то обмеженням на простір в системі з одним супутником можна обійти. Але при цьому виникає необхідність синхронізації передачі від двох незалежних супутників.

У перспективі, раціональним варіантом використання MIMO для супутникових систем є застосування схем попереднього кодування з розрахунку на багато користувачів. Використання такого кодування дозволить усунути недоліки однокористувальницького MIMO з прийнятними затратами (один супутник, термінал з однією антеною), ґрунтуючись на відомій технології супутників з багатопроменевими антенами. При цьому потрібна організація зворотного каналу. Більше того, вигреш щодо пропускної здібності буде мати місце лише з окремих променях. Також, можлива деяка несумісність з діючим

стандартом DVB-S2. Тому перспективні дослідження в цій галузі можуть бути направлені на поліпшення якості каналу зворотного зв'язку та існуючих методів попереднього кодування. Узагалі, впровадження будь-якого методу попереднього кодування на комерційних системах ґрунтується на обмеженні необхідного часу та обсягу службової інформації для оцінки каналу зв'язку.

Зрештою було б логічно об'єднати всі модифікації, необхідні для впровадження попереднього кодування в стандарт DVB-S2. При цьому врахувати, що для реалізації сумісності потрібно, щоб рівні відношення сигнал/перешкода/шум (SINR) на кожному промені мали невелику дисперсію для того, щоб система адаптивного кодування та модуляції використовувала для них однакові параметри.

4.2 Надширокосмугові системи

У наземному зв'язку надширокосмугові сигнали використовуються для передачі інформації в дуже широкому частотному діапазоні без отримання ліцензії та без створення перешкод вузькосмуговим системам. Вони займають нішу малої дальності. Для цього встановлено обмеження на потужність випромінювання з метою мінімального впливу на інші системи зв'язку.

Визначено, що надширокосмугові сигнали мають відносну ширину смуги частот 20% від центральної частоти або 500 МГц для випадку, коли центральна частота вище 6 ГГц.

До основних переваг надширокосмугового зв'язку відносяться: відсутність необхідності ліцензування; стійкість до багатопроменевого поширення; низька ймовірність перехоплення; низька складність обладнання та низька вартість; низьке споживання потужності.

Сферами застосування надширокосмугових сигналів є безпроводні персональні мережі WPAN (Wireless Personal AreaNetwork) з невеликою зоною покриття (радіусом менше 10 м) та розподілені сенсорні мережі. Однак ключові особливості надширокосмугових систем можуть бути використані і в супутниковому зв'язку. Для цього необхідно змінити обмеження на

випромінювану потужність та перенести діапазон робочих частот на частоти, що знаходяться вище діапазону Ка (див. табл. 4.1), де достатньо широка частина діапазону може піддаватися розподілу під час ліцензійного використання [18].

Уже зазначалось, що існують обмеження на потужність випромінювання для надширокосмугових систем, які застосовуються до будь-якої мобільної або фіксованої системи зв'язку. По відношенню до супутникових систем, особливо з геостаціонарними супутниками, позиція яких по відношенню до будь-якої наземної системи фіксована та відома, то критерій обмеження потужності можна змінити. Для цього розраховують мінімальну відстань між супутником і наземною системою зв'язку для того, щоб визначити максимальну потужність сигналу на наземних системах. В результаті до супутникових надширокосмугових систем можна застосувати обмеження на випромінювану потужність, відмінні від таких, що застосовуються для наземних систем. Високошвидкісну передачу даних у супутниковій системі можна організувати, якщо з надширокосмугових супутників організувати передачу сигналів на земну поверхню зі спектральною щільністю потужності вищою, ніж у наземних надширокосмугових передавачів.

Щодо застосування надширокосмугового зв'язку в супутникових системах ключовим є вивчення впливу перешкод на наземні системи. При цьому потрібно забезпечити вибір діапазону частот для надширокосмугових ССЗ та визначити вплив перешкод, які створюються такою системою, на інші системи.

Ліцензовані надширокосмугові ССЗ використовують елементну базу більш низької складності і вони менш чутливі до спотворень радіочастотного сигналу. Тому основною метою використання надширокосмугової передачі є збільшення швидкості передачі в каналі і пропускну здатності системи по відношенню до стандартних методів передачі. Зауважимо, що технології передачі інформації в ССЗ стандартні, але елементна база достатньо складна для їх реалізації.

Одним з найважливіших елементів передавального радіочастотного кола є підсилювач потужності. Він забезпечує передачу сигналу з високою потужністю для того, щоб потужність прийнятого сигналу на земній станції була достатньою для правильного прийому. Можна використовувати або підсилювачі постійного струму, або імпульсні підсилювачі (обидва типи мають широку АЧХ, як відомо).

Підсилювачі постійного струму можуть бути використані при роботі з надширокосмуговими сигналами на сталій несущій, а імпульсні підсилювачі - з імпульсними надширокосмуговими сигналами.

Тривалість імпульсів для імпульсних підсилювачів зазвичай менше наносекунди. Через це спектр сигналу займає одиниці ГГц. Такі сигнали не мають несущої, тому прості і дешеві в реалізації, оскільки не потребують для роботи змішувачів та гетеродинів. У той же час для їх формування потрібні високошвидкісні ЦАП та АЦП для цифрової обробки сигналів. В технології багатостанційного доступу для розширення спектру використовують стрибкоподібне перемикання часових інтервалів або технологію CDMA.

Надширокосмуговий зв'язок із використанням несущих базується на застосуванні різних модуляційних схем. Прикладом надширокосмугових систем з несущими може служити багатодіапазонна OFDM (MB-OFDM) система, яка використовує ФМ/КАМ модуляцію на піднесущих зі стрибкоподібною зміною їх частоти. MB-OFDM-технологія реалізується за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Є варіанти використання різної позиційності методів модуляції на піднесущих та різних частотних інтервалів між ортогональними піднесущими.

Технології надширокосмугової передачі менше схильні до впливу радіочастотних спотворень, таких як нелінійність підсилювачів потужності, фазовий шум та дисбаланс синфазної та квадратурної компонент [16, 18].

Прикладом використання надширокосмугових технологій у супутниковому зв'язку може служити метод надширокосмугової передачі з частотною модуляцією FM-UWB (Frequency Modulation Ultra WideBand). Він

використовує частотну маніпуляцію з низьким індексом модуляції спільно з аналоговою частотною модуляцією з високим індексом для розширення спектру. Перевагою даного методу є простота реалізації та низька чутливість до нелінійності підсилювача потужності.

4.3 Перспектива об'єднання надширокосмугових сигналів з технологією МІМО

Системи СЗ, структура яких об'єднує надширокосмугові сигнали та технології МІМО, можливі. Дослідження у напрямку надширокосмугових систем МІМО (UWB-МІМО) ведуться для досягнення гігабітних швидкостей і у наземних, і у супутникових системах.

Напрямки досліджень: вимірювання та моделювання каналу UWB-МІМО, оцінка пропускної спроможності каналу та просторово-часове кодування, формування діаграми спрямованості антени.

У рамках першого напрямку досліджують рівень просторової кореляції залежно від відстані між антенами у межах інтервалу когерентності (приблизно 4 см). Зміна поляризації сигналу та кута положення антени можуть використовуватися для зменшення кореляції просторових каналів або для збільшення продуктивності системи.

Дослідження пропускної спроможності каналів UWB-МІМО систем проведено у [18]. Якщо зростає число передавальних антен, то ймовірність втрати зв'язку зменшується за умови, що швидкість передачі менша, ніж деяке граничне значення, і збільшується ця ймовірність, якщо швидкість передачі вище порога. Дане граничне значення визначається рівнем завмирань і відношенням сигнал/шум на передавальній стороні. Звідси випливає, що не варто використовувати кілька передавальних антен, якщо питома швидкість передачі вище ніж граничне значення (або доступна потужність передавача занадто низька). Число передавальних антен, число приймальних антен і число ступенів свободи розсіювального середовища накладають фундаментальні обмеження на пропускну здатність системи. Число ступенів свободи накладає

обмеження на ранг матриці каналу UWB-MIMO і, відповідно, впливає кількість незалежних каналів.

Для супутникових систем зв'язку у контексті систем UWB-MIMO важливим є питання дослідження поведінки пропускну здатності каналу в умовах низького відношення сигнал/шум. Для широкосмугових систем дуже широка смуга частот негативно впливає на продуктивність, якщо в системі потужність розподіляється рівномірно за часом і за частотою. Оптимальний розподіл потужності набагато ефективніший для випадку, коли відношення сигнал/шум нижче 20 дБ. Однак, коли відношення сигнал/шум вище 10 дБ, рівномірний розподіл дозволяє отримати таку ж пропускну здатність у каналі.

Стосовно просторово-часових кодів для надширокосмугових систем виявлено, що тільки в тому випадку, коли відношення сигнал/шум досить високе, можна отримати вигоду від кодування розподіляючи потужність випромінювання на більшу кількість антен і використовуючи довші коди. Іншими словами, якщо відношення сигнал/шум дуже низьке, то краще використовувати менше антен і коротші просторово-часові коди.

Вивчення питань формування діаграми спрямованості антен показує, що ширина смуги сигналу практично не впливає на ширину випромінюваного променя або на напрямок випромінювання. Є особливості формування характеристики спрямованості. Використання в надширокосмугових променеутворювачах неоднакових зважувальних фільтрів для різних антенних гілок збільшує рівень бічних пелюсток. Отже, оптимальним променеутворювачем є той, у якого зважувальні фільтри в кожній гілці ідентичні.

Найбільш ймовірною областю застосування багатоантенної надширокосмугової технології є визначення відстані та зондування. За допомогою багатоантенної технології можна отримати додаткові просторові параметри (наприклад, напрямок приходу або напрямок відправлення), що може призвести до більш високої точності при визначення відстані. Це є

актуальним у напрямку практичного застосування в системах супутникового зв'язку.

4.4 Технологія OFDM

Ця технологія широко використовується в сучасних системах зв'язку. Її переваги - висока стійкість до частотно-селективних замирань у каналі, а також висока спектральна ефективність [15].

OFDM застосовується на фізичному рівні більшості використовуваних безпроводних стандартів, а також у наземному цифровому відеомовленні (DVB-T). Вважалося, що ця технологія передачі непридатна для ССЗ, оскільки OFDM-сигнал володіє великим пікфактором. З цієї причини OFDM сигнали чутливі до нелінійних спотворень підсилювачів потужності передавача, що є одним з найважливіших показників при роботі з супутниковими системами. Але якщо застосовувати спеціальні алгоритми кодування OFDM-сигналу в поєднанні з використанням методу компенсації нелінійних спотворень, то це може забезпечити задовільну продуктивність навіть у режимі роботи підсилювача, близькому до насичення. Підстави для використання OFDM у ССЗ:

- нова архітектура розбиття на канали;
- висока спектральна ефективність;
- забезпечення роботи в умовах багатопроменевого розповсюдження;
 - можливість зменшення загального навантаження на супутниковий приймач (розглядається регенеративна архітектура);
- при використанні наземної та супутникової гібридної системи зв'язку, в наземному сегменті з OFDM, застосування тієї ж технології для супутникового компонента може зменшити складність приймача.

Остання підстава була основною для використання OFDM у стандарті DVB-SH, з необхідними модифікаціями і поліпшеннями порівняно з DVB-H. DVB-SH це стандарт мовлення для надання мультимедіа сервісів з гібридної наземної/супутникової мережі для різноманітних невеликих мобільних та

стаціонарних терміналів з компактними антенами з їх обмеженою спрямованістю. Також OFDM застосовують у військовому зв'язку. Зокрема, його використовують як фізичний рівень широкосмугової мережі інтегрованої тактичної системи радіозв'язку [17].

Рішенням стосовно подолання високого пікфактора є модифікація OFDM з постійною обвідною (CE-OFDM – Constant Envelope OFDM) [17, 18]. У системі CE-OFDM, OFDM сигнал змінюється за допомогою методів фазової модуляції таким чином, що він стає придатним для ефективного підсилення потужності. На прийомі перед OFDM демодулятором використовується зворотне перетворення (фазова демодуляція). За допомогою фазової модуляції виходить сигнал із постійною обвідною, що має відношення пікової потужності до середньої 0 дБ. CE-OFDM-система має більш високу пропускну здатність у порівнянні зі звичайними OFDM системами в каналах з багатопроменевими завмираннями, якщо враховується ефект нелінійного посилення потужності. Позитивні якості систем зв'язку з кількома несущими можна реалізувати за допомогою систем з однією несущою з циклічним префіксом з вирівнюванням в частотній області.

Слід зазначити, що стандарт LTE (Long Term Evolution), який представляє еволюцію систем зв'язку у бік 4G, використовує схему множинного доступу, засновану на OFDM, при передачі «вниз» та FDMA (Frequency Division Multiple Access) з перемежуванням, що є варіантом вирівнювання в частотній ділянці з однією несущою (SC-FDE), під час передачі «вгору».

Ефективність SC-FDE-систем схожа із системами, що використовують кілька несущих. Важлива особливість - це низьке відношення пікової потужності до середньої, що робить термінали користувачів більш енергоефективними. Отже, технологія SC-FDE є більш привабливою для використання в системах супутникового зв'язку в порівнянні з OFDM, при цьому вона залишається сумісною з OFDM, оскільки використовує циклічний префікс у частотній області.

Також зазначимо, що перспективні ширококутові супутникові системи будуть працювати на частотах вище 40 ГГц (діапазон Q/V, і в подальшому W-діапазоні). У цьому випадку перевага також на боці систем SC-FDE, а не OFDM, через їх меншу чутливість до радіочастотних спотворень.

4.5 Висновки до розділу

Показано, що впровадження розглянутих варіантів застосування технології MIMO у ССЗ дозволить підвищити пропускну спроможність та ефективність цих систем. При цьому необхідні додаткові дослідження для адаптації даної технології в системах супутникового зв'язку. Привабливим є використання надширококутових сигналів у неліцензованих супутникових системах при використанні дозволу на передачу в деякому діапазоні з обмеженнями по потужності випромінювання. Додатково потрібно з'ясувати вплив завад та обмеження за потужністю на ефективність таких ССЗ.

Використання надширококутових сигналів у поєднанні з технологією MIMO (UWB-MIMO) може бути найбільш перспективним, якщо реалізується одночасно при використанні у високошвидкісних наземних та супутникових сегментах.

Надширококутові сигнали можуть бути використані в ліцензованих ССЗ без обмеження за потужністю. Це не оптимізує використання спектра, але може збільшити пропускну спроможність каналу.

Показано, що технологія OFDM в ССЗ може бути доцільною через зменшення загальної складності супутникового приймача, збільшення спектральної ефективності фіксованих супутникових систем зв'язку, зменшення складності інтеграції супутникових та наземних мобільних систем зв'язку. Установлено, що системи SC-FDE можуть надати такі ж переваги, як і системи OFDM, але при цьому, не маючи їх недоліків при використанні супутниками. Отже, впровадження технології SC-FDE у системи супутникового зв'язку є перспективним напрямком для подальших досліджень.

5 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах»

можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	54	0	52
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	40	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		48,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПШБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	61	0	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	60	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	61,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [19]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 48,7$, $k_{теор} = 61,0$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 48,7 + 0,4 \cdot 61,00 = 53,60 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах», даний рівень становить 53,60 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій,

секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [19]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 16450,00 \cdot 32 / 21 = 25066,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16450,00	783,33	32	25066,67
Ст. науковий співробітник	15910,00	757,62	32	24243,81
Консультант (фахівець служби підтримки систем супутникового зв'язку)	16055,00	764,52	8	6116,19
Провідний фахівець	7210,00	343,33	21	7210,00
Всього				62636,67

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [19];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 59,22 \cdot 5,30 = 313,88 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Налаштування робочого місяця дослідника	5,30	2	1,10	59,22	313,88
Інсталяція програмного забезпечення моделювання та розробки	6,42	4	1,50	80,76	518,47
Компіляція моделі системи супутникового	7,66	5	1,70	91,53	701,10

зв'язку					
Тренування моделі	3,21	4	1,50	80,76	259,24
Проведення цифрового експерименту	8,00	3	1,35	72,68	581,46
Формування бази даних результатів	14,00	3	1,35	72,68	1017,56
Всього					3391,71

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (62636,67 + 3391,71) \cdot 10 / 100\% = 6602,84 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (62636,67 + 3391,71 + 6602,84) \cdot 22 / 100\% = 15978,87 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{\text{в}j}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 4,0 \cdot 169,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 743,60 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Начиння канцелярське	169,00	4,0	0	0	743,60
Картридж для принтера (HP-2002)	1056,00	1,0	0	0	1161,60
Картридж для плотера (HP-2106)	400,00	2,0	0	0	880,00
Диск оптичний (CD-RW)	32,00	3,0	0	0	105,60
Диск оптичний (CD-R)	26,00	3,0	0	0	85,80
USB-пам'ять (16 ГБ)	126,00	2,0	0	0	277,20
Органайзер офісний	177,00	4,0	0	0	778,80
Папір для заміток	116,00	2,0	0	0	255,20

(A5) 500-70					
Папір канцелярський офісний (A4) 500-80	184,00	2,0	0	0	404,80
Папір креслярський (A1)	30,00	8,0	0	0	264,00
Папір креслярський (A3)	14,50	10,0	0	0	159,50
Всього					5116,10

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 850,00 \cdot 1,1 = 935,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Радіомодем	1	850,00	935,00
Вузол живлення	1	210,00	231,00
Всього			1166,00

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 47471,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 52218,10 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Хотспот Iridium GO!	1	47471,00	52218,10
СУПУТНИКОВИЙ ТЕЛЕФОН IRIDIUM 9555	1	52020,00	57222,00
СУПУТНИКОВИЙ ТЕЛЕФОН GLOBALSTAR GSP-1700	1	58999,00	64898,90
МОРСЬКИЙ КОМПЛЕКТ Globalstar GSP-1700 (GSP-1700S-EU, GIK-1700-MR, GIK-32-EXTEND, GPH-1700, GDC-1700-CBL, GDC-1700CD-EU)	1	77168,00	84884,80
Всього			259223,80

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прг.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прг}} = 7800,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8580,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	7800,00	8580,00
Пакет Microwave Office	1	7150,00	7865,00
Пакет MATLAB SIMULINK	1	5210,00	5731,00
Всього			22176,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{г}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{г}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (44560,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 1856,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс системи проектування	44560,00	4	2	1856,67
Персональний комп'ютер дослідника мереж	21599,00	4	2	899,96
Спеціалізоване робоче місце дослідника	8600,00	5	2	286,67
Пристрої виводу інформації	6850,00	4	2	285,42
СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ LT-3100 IRIDIUM - БАЗОВА	142176,00	5	2	4739,20
СИСТЕМА Globalstar Sat-Fi Satellite Hotspot	185659,00	5	2	6188,63
Оргтехніка	7200,00	5	2	240,00
Приміщення лабораторії досліджень	398000,00	25	2	2653,33
Всього				17149,88

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,28 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 504,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс системи проектування	0,28	240,0	504,00
Персональний комп'ютер дослідника мереж	0,08	240,0	144,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,06	240,0	108,00
Пристрої виводу інформації	0,12	6,0	5,40
СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ LT-3100 IRIDIUM - БАЗОВА	0,05	20,0	7,50
СИСТЕМА Globalstar Sat-Fi Satellite Hotspot	0,07	20,0	10,50
Оргтехніка	0,45	2,3	7,76
Всього			787,16

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де $H_{\text{сп}}$ – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{\text{сп}} = 30\%$.

$$B_{\text{сп}} = (62636,67 + 3391,71) \cdot 30 / 100\% = 19808,51 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_{\text{o}} + Z_{\text{p}}) \cdot \frac{H_{\text{ів}}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де $H_{\text{ів}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ів}} = 50\%$.

$$I_{\text{в}} = (62636,67 + 3391,71) \cdot 50 / 100\% = 33014,19 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_{\text{o}} + Z_{\text{p}}) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (62636,67 + 3391,71) \cdot 100 / 100\% = 66028,38 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 62636,67 + 3391,71 + 6602,84 + 15978,87 + 5116,10 + 1166,00 + 259223,80 + 22176,00 + 17149,88 + 787,16 + 0,00 + 19808,51 + 33014,19 + 66028,38 = 513080,11 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$ZB = 513080,11 / 0,95 = 540084,32 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 540084,32$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I, n, T_C, R, B, t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [19].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^3 \cdot 2 \cdot 4}{540,1 \cdot 0,08} = 11,38.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» складають 540084,32 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Оптимізація системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах відбувалася в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника, згідно [20], могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

6.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Головними елементами робочого місця розробника оптимізації системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до [20].

Згідно із [21] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа - не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Під час безпосередньої роботи з монітором, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

1. Верхній край екрану монітора повинен знаходитися на одному рівні з очима користувача.

2. Під час роботи потрібно звертати особливу увагу на положення шиї, хребта, ліктів, кистей, стегон і ступень.

3. Клавіатура повинна знаходитися під тим же кутом, що і передпліччя.

4. Слід систематично робити перерви. Фахівці рекомендують кожен годину робити перерву на п'ять-десять хвилин.

5. Кожні десять-п'ятнадцять хвилин роботи за комп'ютером необхідно дати відпочинок очам, закриваючи їх на якусь мить.

6. Слід встановити монітор так, щоб від нього не відбивалося світло.

7. Читання паперових документів вимагає сильнішого освітлення, ніж читання з екрану монітора. Якщо працівник одночасно працює за комп'ютером і з паперовими документами, слід скористатися настільною лампою.

8. Екран монітора й інші поверхні комп'ютера необхідно регулярно протирати.

Приміщення із робочими місцями користувачів комп'ютерів для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби захисту відповідно до [4].

Категорія приміщення з електробезпеки – без підвищеної небезпеки, згідно [22].

ПК, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники тощо), електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПУЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування

проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- увімкнути систему кондиціонування в приміщенні;
- перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран - під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має бути трохи нахиленим, нижній його край ближче до оператора;

- перевірити загальний стан апаратури, перевірити справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана;

- відрегулювати освітленість робочого місця;

- відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, зручний для користувача нахил його спинки;

- приєднати до системного блоку необхідну апаратуру. Усі кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід вставляти та виймати при вимкненому комп'ютері;

- ввімкнути апаратуру комп'ютера вимикачами на корпусах в послідовності: монітор, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування);

- відрегулювати яскравість свічення монітора, мінімальний розмір світної точки, фокусування, контрастність. Не слід робити зображення надто яскравим, щоб не втомлювати очей.

Вимоги безпеки під час виконання роботи:

- необхідно стійко розташовувати клавіатуру на робочому столі, не опускати її хитання. Під час роботи на клавіатурі сидіти прямо, не напружуватися;

- для уникнення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу «миша» належить забезпечувати вільну велику поверхню столу для переміщення миші і зручного упору ліктьового суглоба;

- не дозволяються сторонні розмови, подразнюючі шуми;
- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою порох з поверхонь апаратури.

–

6.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє підсиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі при випаровуванні поту.

При підвищенні температури повітря мають місце зворотні явища. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати. За такої високої температури та вологості практично все тепло, що виділяється, віддається у навколишнє середовище при випаровуванні поту. При підвищенні вологості піт не випаровується, а стікає краплинами з поверхні шкіри.

Недостатня вологість призводить до інтенсивного випаровування вологи зі слизових оболонок, їх пересихання та розтріскування, забруднення хвороботворними мікробами.

Робота з оптимізації системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [23]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.6.1

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється робота з оптимізації системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

6.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці.

Рівень освітлення на робочих місцях впливає на гостроту зору, тривалість ясного бачення, контрастну чутливість і здатність бачити на далекій і близькій відстані. Нормальна гострота зору, тобто здатність розрізняти дрібні предмети, у працівників, що не страждають на дефекти зору, досягається лише при освітленні 50-70 лк. Для максимальної здатності ока розрізняти такі предмети необхідна освітленість 600-1000 лк.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.4 [24]:

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

6.2.4 Виробничий шум

Шумом прийнято вважати звуки, які негативно впливають на організм людини і заважають його роботі та відпочинку. Ступінь такого впливу переважно залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в [25]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи з оптимізації системи супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного інтернет-доступу у віддалених районах із використанням ПК на працівника діє підвищений рівень електромагнітного поля. Випромінювання ПК можуть бути небезпечними для здоров'я. Низькочастотні поля при тривалому опроміненні сидять біля ПК людей можуть привести до порушень фізіологічних процесів.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження області працездатності РЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

6.3.1 Дія електромагнітних випромінювань на радіоелектронні системи

Робота радіоелектронної системи (РЕС) в умовах дії радіоактивних випромінювань має наступну специфіку: РЕС може миттєво втратити працездатність при критичних рівнях радіації; в елементах схем РЕС можуть відбутись незворотні і зворотні процеси.

Під час електромагнітного імпульсу можуть спостерігатись високі імпульси напруг і струмів в провідниках і кабелях зв'язку, електропередач,

автоматичних систем управління та систем обчислювальних машин, антенах радіостанцій та ін. [27].

6.3.2 Визначення області працездатності приладу в умовах дії електромагнітних випромінювань

Вихідні дані: $U_{ж} = 220 \pm 5\% \text{ В}$; $l_{Г} = 0,2 \text{ м}$; $l_{В} = 0,15 \text{ м}$.

В якості критерію стійкості РЕС в умовах дії електромагнітного імпульсу приймається коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою [28]

$$K_B = 20 \lg \frac{U_D}{U_G} \geq 40 \text{ [дБ]}. \quad (6.1)$$

Знаходимо допустиме коливання напруги живлення

$$U_D = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} N \text{ [В]}; \quad (6.2)$$

$$U_D = 220 + \frac{220}{100} 5 = 231 \text{ (В)},$$

де $U_{ж}$ – робоча напруга живлення, В;

N – допустимі коливання напруги, %.

З формули (6.1) виразимо горизонтальну складову напруги наведення на струмопровідних частинах РЕС

$$U_G = \frac{U_D}{100} \text{ [В]}; \quad (6.3)$$

$$U_G = \frac{231}{100} = 2,31 \text{ (В)}.$$

Визначаємо допустиму вертикальну складову напруженості електромагнітного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого

$$U_{\Gamma} = E_B I_{\Gamma} \text{ [В]}, \quad (6.4)$$

звідки

$$E_B = \frac{U_{\Gamma}}{I_{\Gamma}} \text{ [В/м]}; \quad (6.5)$$

$$E_B = \frac{2,31}{0,2} = 11,55 \text{ (В/м)}.$$

Отже, область працездатності приладу обмежена значенням вертикальної складової напруженості електромагнітного поля від 0 до 11,55 В/м.

6.3.3 Розробка превентивних заходів з розширення області працездатності РЕС в умовах дії НС

Найефективнішим способом підвищення збільшення стійкості роботи РЕС є екранування системи або її елементів. З цією метою проводиться розрахунок екрану. Визначаємо перехідне затухання енергії електричного поля сталевим екраном:

$$A = K_{\text{ном}} - K_{\text{мін}} \text{ [дБ]}; \quad (6.6)$$

$$A = 40 - (-40) = 80 \text{ (дБ)},$$

де $K_{\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт безпеки ($K_{\text{ном}} = 40$ дБ);

$K_{\text{мін}}$ – мінімальний розрахунковий коефіцієнт безпеки ($K_{\text{мін}} = -40$ дБ).

Товщину захисного екрану знаходимо за формулою:

$$t = \frac{A}{k\sqrt{f}} \text{ [см]}; \quad (5.7)$$

$$t = \frac{80}{5,2 \cdot \sqrt{400000}} = 0,024 \text{ (см) } = 0,24 \text{ (мм)},$$

де k – коефіцієнт, що для сталюого екрана дорівнює 5,2;

f – найбільш характерна частота, Гц ($f = 400000$ Гц).

Зростання стійкості роботи РЕС можна досягти через посилення найбільш слабких елементів і ділянок системи, а також завчасним проведенням комплексу технологічних, інженерно-технічних та організаційних заходів, що спрямовані на максимальне зменшення дії уражаючих чинників та створення передумов для відновлення працездатності приладу.

6.4 Висновки до розділу

Досліджено область працездатності РЕС в умовах дії загрозливих чинників НС. Використання екранування РЕС значно розширює її область працездатності в умовах впливу електромагнітного імпульсу

ВИСНОВКИ

Розглянуто структуру системи супутникового зв'язку та призначення її складових частин: космічного сегменту, сигнальної частини, користувацького сегменту, наземного сегменту. Показано, що супутниковий зв'язок базується на використанні штучних супутників Землі і здійснюється між земними станціями, які можуть бути як стаціонарними, так і мобільними.

Проаналізовано варіанти побудови бортових ретрансляторів ШСЗ. Зазначено, що традиційною схемою побудови БРТК з безпосередньою ретрансляцією є багатоствольна схема з числом стовбурів до декількох десятків і подвійним перетворенням частоти в кожному стовбурі. Наведена альтернативна структурна схема, у якій використовується ретранслятор з обробкою сигналів.

Наведена структурна схема та проаналізована робота земної станції.

Якісний зв'язок у ССЗ забезпечується необхідним для всіх радіоліній енергетичним балансом. В ССЗ РО використовується п'ять типів радіоліній: радіолінії «вгору» (ЗС – СР, ЦЗС – СР), радіолінії «вниз» (СР – ЗС, СР – ЦЗС) та радіолінії між ШСЗ (СР – СР). Визначені в результаті енергетичного розрахунку основні параметри каналів зв'язку ЗС – СР та СР – ЗС, які є найбільш чутливими в енергетичному відношенні з урахуванням роботи мобільних терміналів.

Проаналізовано три варіанти розподілу ресурсів супутникових ретрансляторів: використання декількох СР, які працюють в різних частотних діапазонах; розподіл каналів для реалізації багатостанційного доступу в стволі; динамічний розподіл і надання каналів на основі методів розподілу запитів.

Виконано аналіз енергетичного балансу за критерієм високошвидкісного Інтернет-доступу з урахуванням фактичного використання п'яти типів радіоліній. Найбільш напруженими в енергетичному відношенні є радіолінії ЗС-СР і СР-ЗС у зв'язку з тенденцією переходу в ССЗ для рухомих об'єктів від

мобільних земних терміналів до «ручних», тобто до суттєвого зниження потужності передавача ЗС.

Проведено аналіз робочого діапазону, впливу гідрометеорів та шумів космічних джерел на швидкість передачі даних по лінії КА-ЗС. Показано розподіл смуги частот супутникового ретранслятора для ЗС при реалізації багатостанційного доступу з частотним розділенням сигналів.

Визначено гранично досяжні швидкості передачі даних залежно від співвідношення сигнал/шум та розглянуто варіанти підвищення цієї швидкості.

Спектрально ефективні методи квадратурної амплітудної модуляції (QAM) у порівнянні з фазовою (PM) модуляцією суттєво виграють у завадостійкості. Наприклад, застосування модуляції 32-QAM спільно з завадостійким кодом дозволяє забезпечити спектральну ефективність передачі 4 біт/с/Гц (2 Гбіт/с у смузі 500 МГц).

В усіх варіантах підвищення швидкості передачі даних для виправлення помилок, що виникають, доцільно застосовувати ефективне завадостійке кодування.

Проведено моделювання підвищення ефективності Інтернет-доступу з використанням передових технологій. Показано, що впровадження технології MIMO у ССЗ дозволить підвищити пропускну спроможність та ефективність цих систем. При цьому необхідні додаткові дослідження для адаптації даної технології в системах супутникового зв'язку. Привабливим є використання надширокосмугових сигналів у неліцензованих супутникових системах при використанні дозволу на передачу в деякому діапазоні з обмеженнями по потужності випромінювання. Додатково потрібно з'ясувати вплив завад та обмеження за потужністю на ефективність таких ССЗ.

Використання надширокосмугових сигналів у поєднанні з технологією MIMO (UWB-MIMO) може бути найбільш перспективним, якщо реалізується одночасно при використанні у високошвидкісних наземних та супутникових сегментах.

Надширокосмугові сигнали можуть бути використані в ліцензованих ССЗ без обмеження за потужністю. Це не оптимізує використання спектра, але може збільшити пропускну спроможність каналу.

Установлено, що системи SC-FDE можуть надати такі ж переваги, як і системи OFDM, але при цьому, не маючи їх недоліків при використанні супутниками. Отже, впровадження технології SC-FDE у системи супутникового зв'язку є перспективним напрямком для подальших досліджень.

У роботі виконано також економічні розрахунки та наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Срібна І.М., Є.І. Махонін, Власенко Г.М., Кирпач Л.А. Супутникові системи зв'язку і навігації. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2019. –123 с.
2. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
3. Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем. Навч. посіб./ Під ред. А.О. Ліпатова. 2-е вид. – К:ІТС НТТУ «КПІ», 2013 – 260с. (електронна версія).
4. Гнатушенко, В.В. Системи супутникового та стільникового зв'язку [Текст]: навч. посіб. / В.В. Гнатушенко, О.О. Дробахін, В.М. Корчинський. – Д.: РВВ ДНУ, 2012. – 80 с.
5. Багатоканальний комплекс впливу електромагнітного випромінювання на наземні і супутникові широкосмугові лінії радіозв'язку /Наритник Т.М., Сайко В.Г., Мікрюков С.А., Сарапулов С.В. Патент України на корисну модель №140198, дата публікації 10.02.2020 р. Бюл.№3 з пріоритетом від 08.07.2019
6. Збірник наукових праць КПІ. – Вип.№47. – К.: НТУУ КПІ. 2018
7. Слободянюк П.В., Наритник Т.М., Благодарний В.Г., Сайко В.Г., Булгач В.Л. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу. Навчальний посібник. / за редакцією Кривуци В.Г. К.: ДУІКТ, 2012. – 596с.
8. Ільченко М.Ю. Науково-технічна космічна програма НТУУ «КПІ». Космічні дослідження в Україні (2014—2016): звіт до COSPAR / Інститут космічних досліджень НАН України — Державне космічне агентство України. — К.: Академперіодика, 2016. С. 129—133.
9. Радіомережі: Багатоантенні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В.А. Головін, О.О. Шпилька ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,36 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 169 с.

10. Косарський Ю.С. Телебачення та відеотехніка: навчальний посібник. - СПб. 2004. - 183 с.
11. Пат: 56120, Космічна платформа /Вайсеро Михайло Васильович, Добробушина Марина Гаріївна, Зубенко Володимир Пилипович, Кавун Василь Вікторович, Щудро Анатолій Петрович; опубл. 10.01.2011р.
12. Пат: 52549, Спосіб формування діаграми спрямованості антенної системи, яка складається з окремих антен /Тітова Марина Анатоліївна, Межуєв Микола Миколайович, Кабардін Микола Костянтинівич, Винокуров Володимир Сергійович, Степанян Беніамін Гургенович, Алексєєв Юрій Сергійович, Однороженко Василь Борисович; опубл.16.12.2002р.
13. Пат: 56077, Спосіб орієнтації штучних супутників Землі /Самотокін Борис Борисович, Шостачук Дмитро Миколайович; опубл. 15 04 2003р.
14. Пат: 27072, Мережа супутникового зв'язку та спосіб забезпечення повного зв'язку між двома будь-якими термінальними пристроями мережі/ ГроссТодд В., ФілдінгДенніс Е.; опубл. 28.02.2000.
15. Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем. Навч. посіб./ Під ред. А.О. Ліпатова. 2-е вид. – К:ІТС НТТУ «КПШ», 2013 – 260с.
16. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. Том 1. / Поповський В.В., Лемешко О.В., Ковальчук В.К., Плотніков М.Д., Картушин Ю.П. та інші. – Х.: ХНУРЕ. 2018 р.
17. Биков П.І., Кононова І.В. аналіз використання супутників низької навіколоземної орбіти для вирішенні задач всесвітньої мережевої взаємодії — Міжнародна Науково-технічна Конференція «Перспективи телекомунікацій» XV Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій 2021».
18. Ільченко М.Ю. Науково-технічна космічна програма НТУУ «КПШ». Космічні дослідження в Україні (2014—2016): звіт до COSPAR / Інститут космічних досліджень НАН України — Державне космічне агентство України. — К.: Академперіодика, 2016. С. 129—133

19. Література: Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

20. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

21. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

22. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npraop_0_00-7_15-18_01_ua.php

23. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

24. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

25. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

26. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

27. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

28. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku->

[nor4878.html](#)

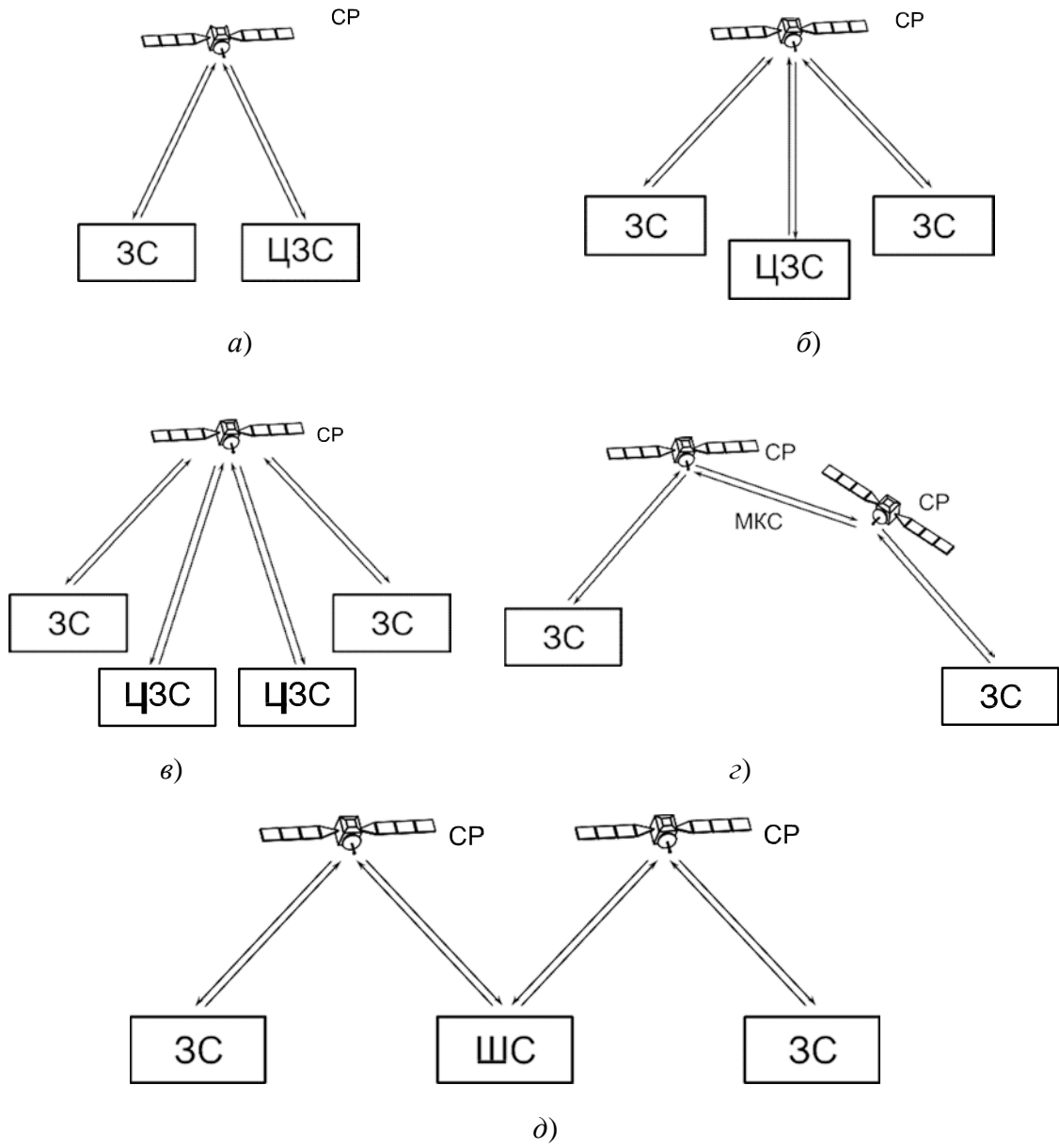
29. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДГУ, 2001. – 109 с.

Додаток А
(обов'язковий)

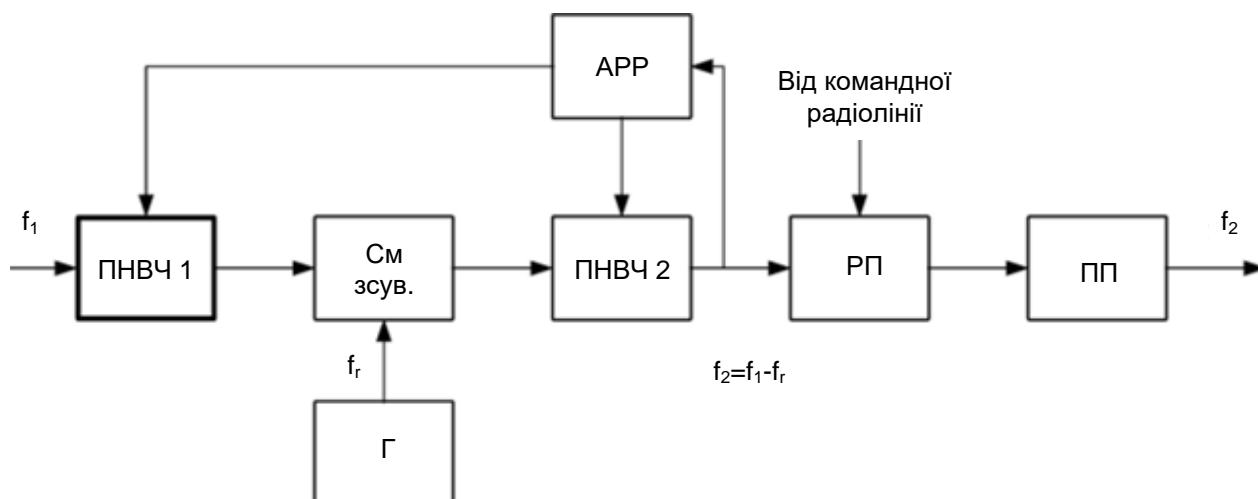
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТА СТАБІЛЬНОГО ІНТЕРНЕТ-ДОСТУПУ У ВІДДАЛЕНИХ РАЙОНАХ

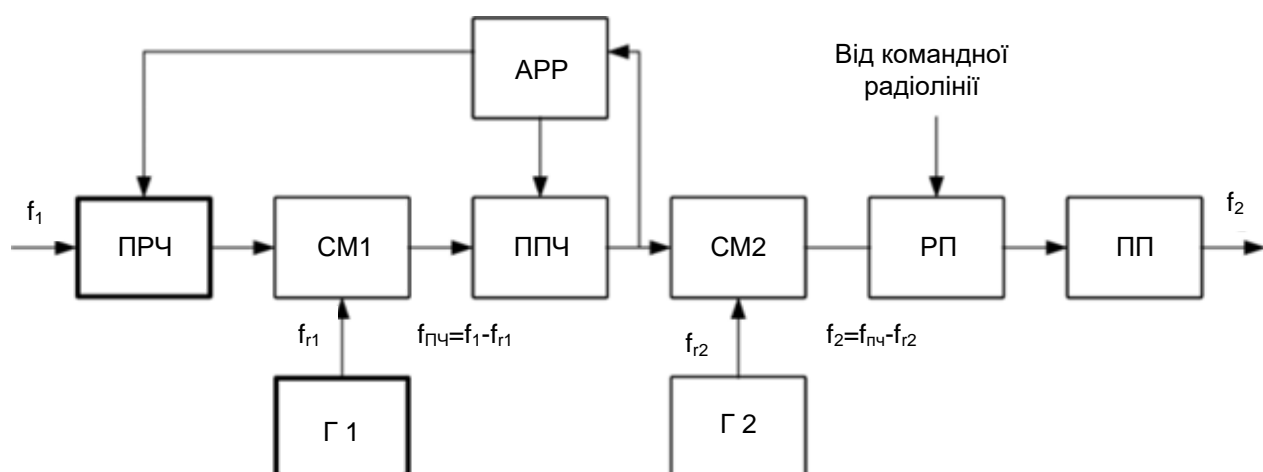
назва магістерської кваліфікаційної роботи



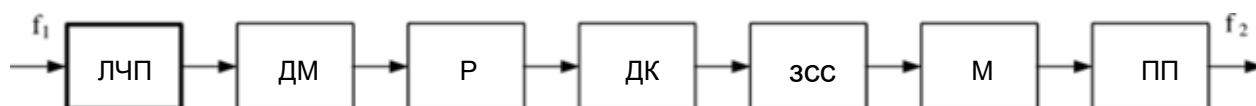
Системи супутникового зв'язку за варіантами маршрутизації



Структурна схема ретранслятора з одним перетворенням частоти



Структурна схема ретранслятора з подвійним перетворенням частоти

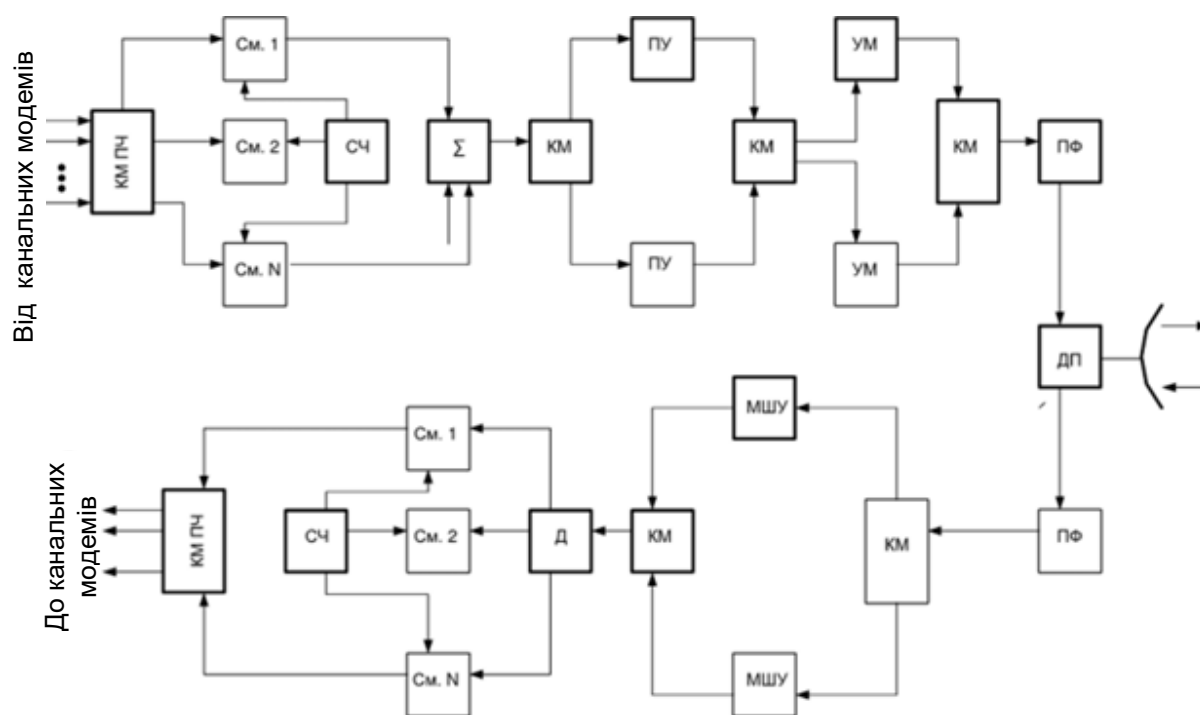


Структурна схема ретранслятора з бортовою обробкою

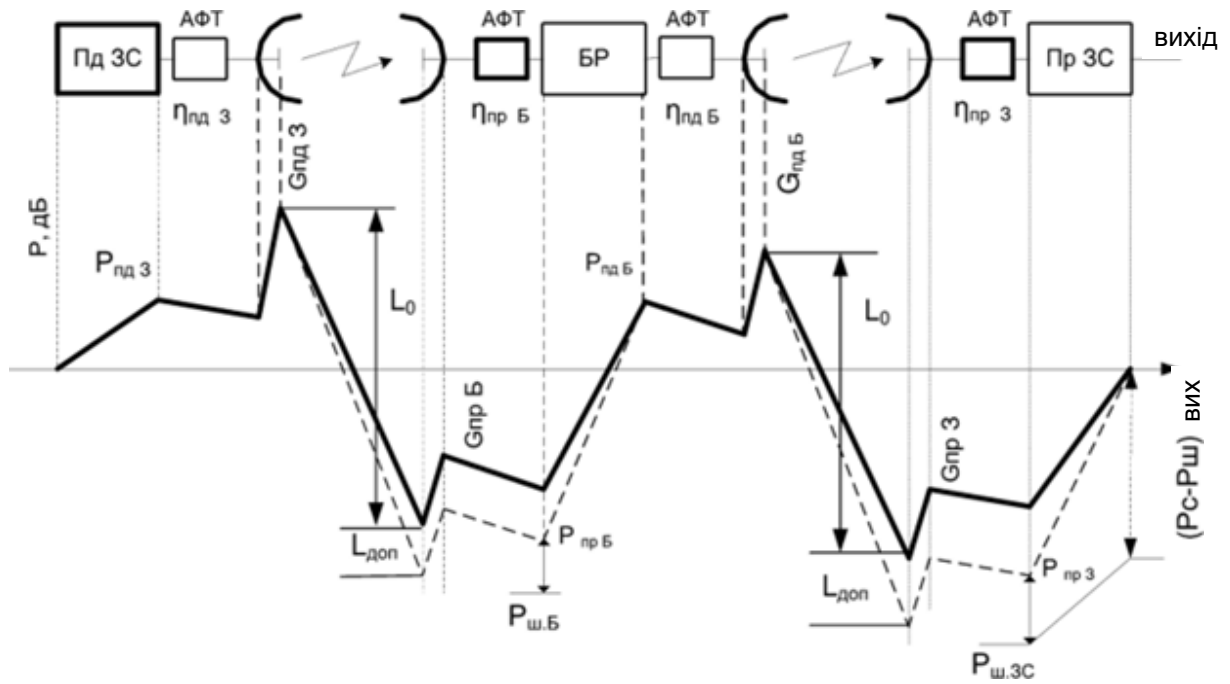
ЛЧП - лінійна частина приймача, ДМ - демодулятор, Р - регенератор,

ДК - декодер, ЗСС - зміна структури сигналу та кодування,

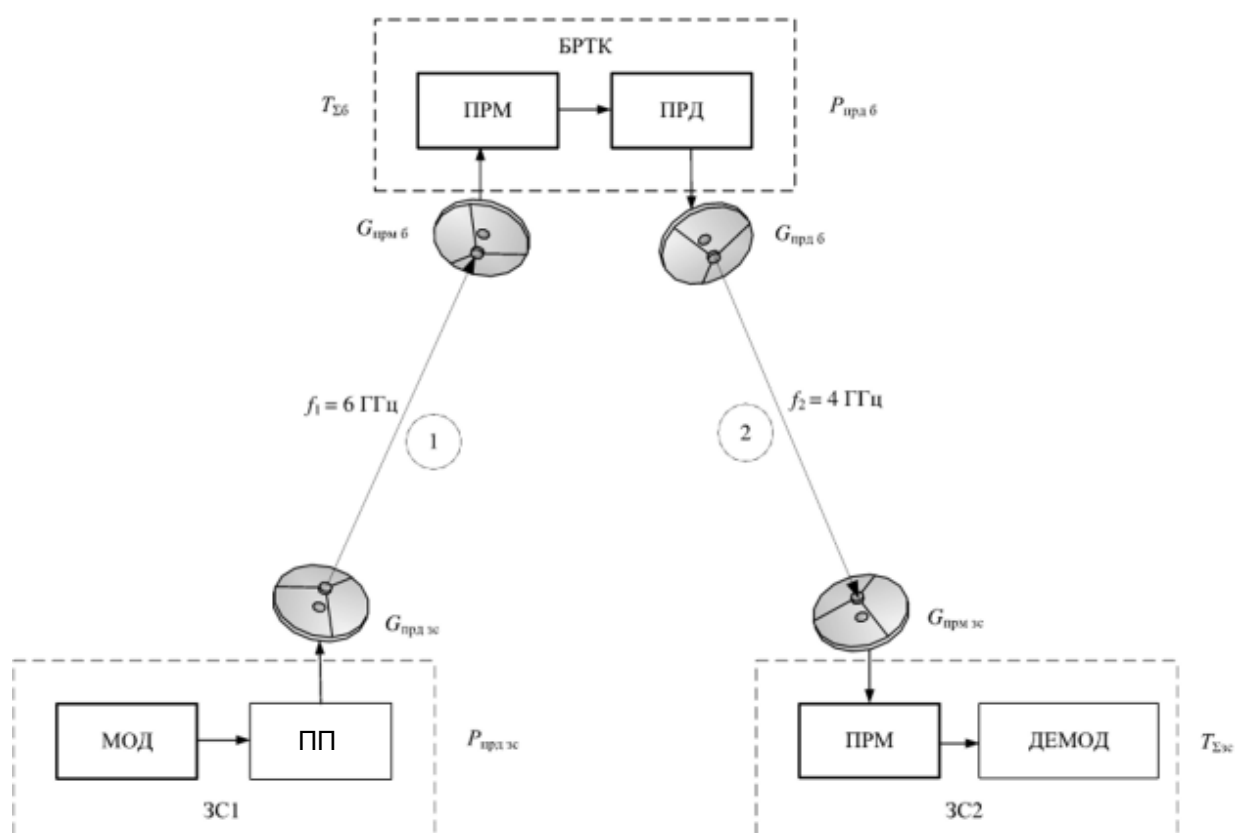
М - модулятор, ПП - підсилювач потужності



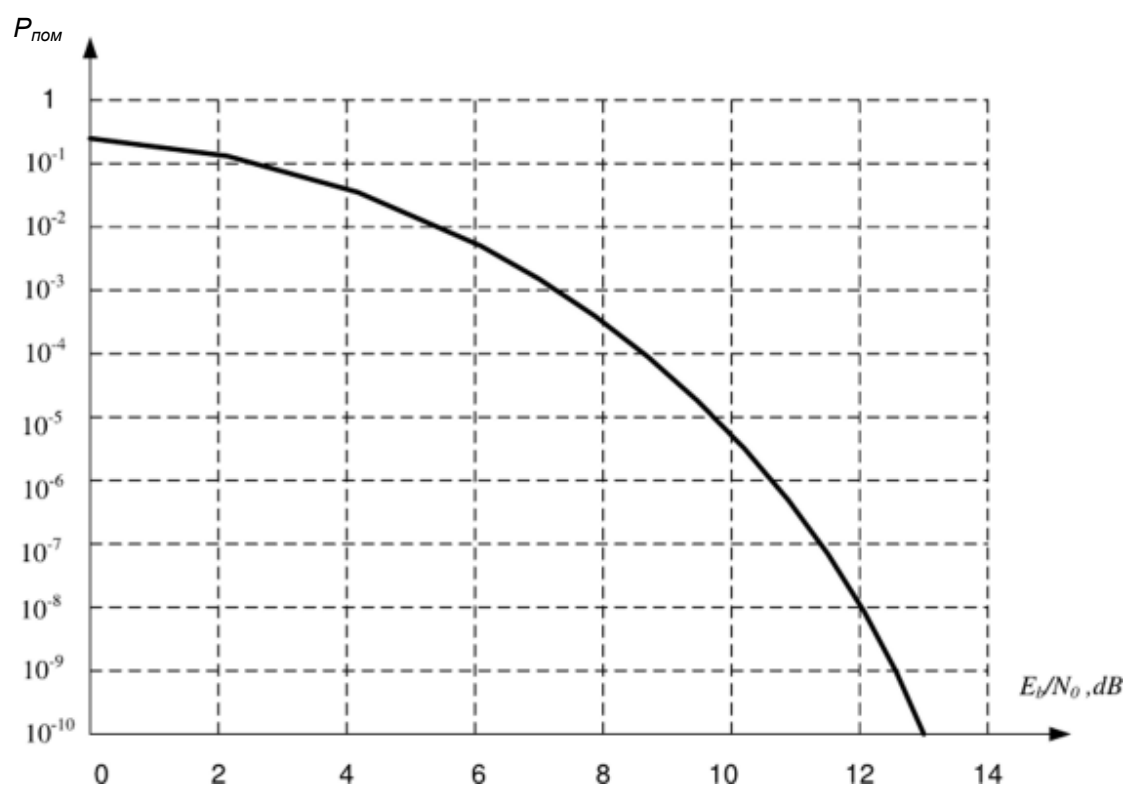
Спрощена структурна схема земної станції ССЗ



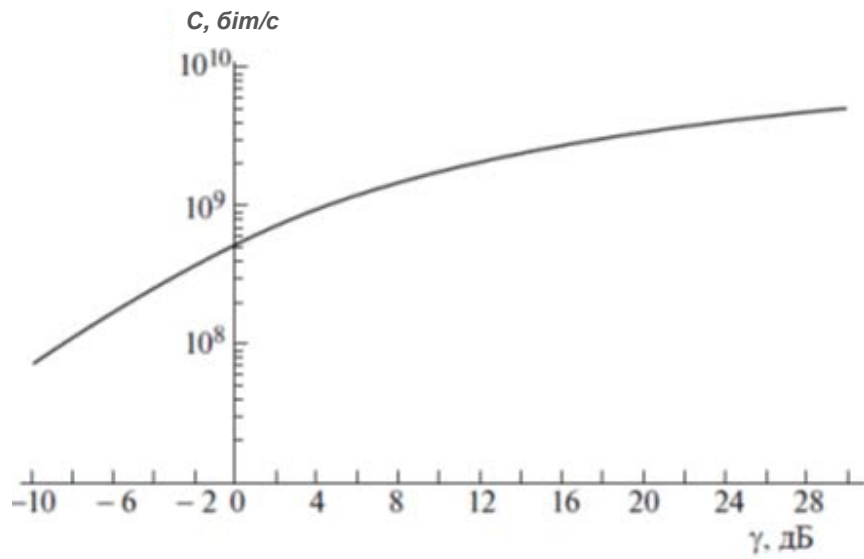
Структурна схема супутникової радіолінії, що складається з двох ділянок



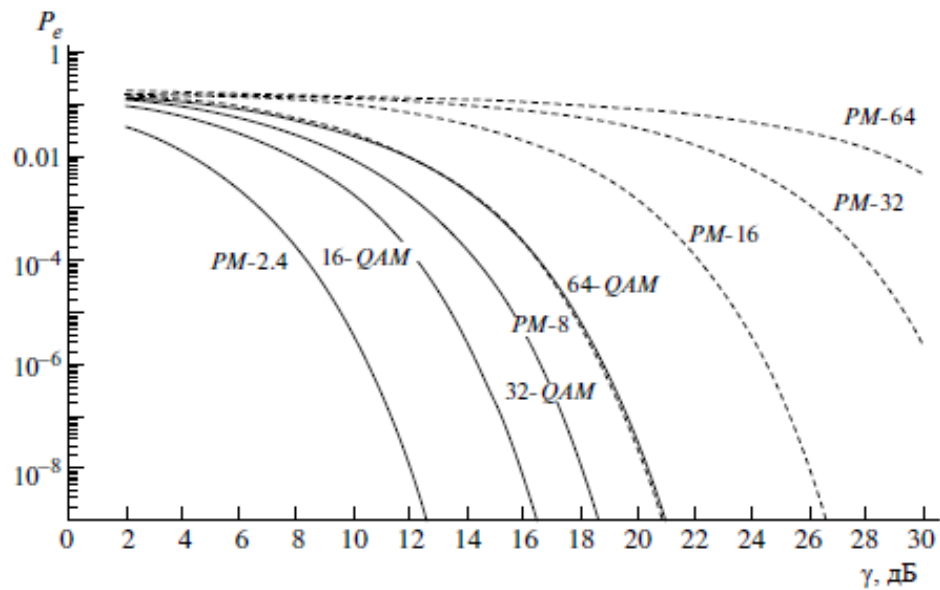
Узагальнена структурна схема ССЗ



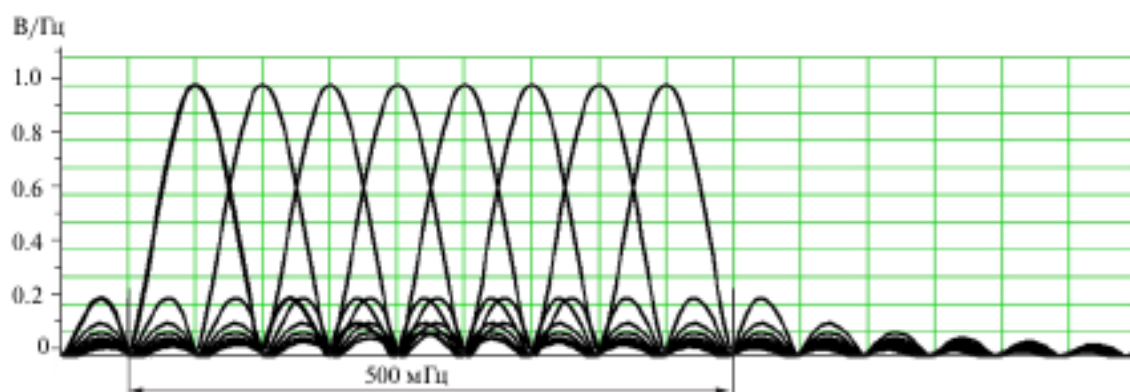
Залежність коефіцієнта помилок від відношення сигнал/шум



Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення сигнал/шум для смуги каналу 500 МГц



Імовірності бітової помилки когерентного прийому фазоманіпульованих сигналів (PM) з постійною обвідною (пунктир) та спектрально ефективних сигналів QAM



Фрагмент модулів спектральної щільності напруги
від восьми ортогональних піднесущих

Порівняльна таблиця варіантів підвищення швидкості передачі даних

Методи підвищення швидкості передачі даних	Переваги методу	Недоліки методу
Ефективна модуляція	Висока спектральна ефективність передачі даних	Необхідність лінеаризації ПП. Алгоритмічна складність реалізації
Застосування технології OFDM	Максимально можлива спектральна ефективність для заданого типу модуляції. Гнучкість технології. Малий вплив смуги когерентності каналу зв'язку	Необхідність лінеаризації ПП. Алгоритмічна складність реалізації
Використання мм діапазону	Висока швидкість передачі даних	Технологічна складність реалізації

Додаток Б

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Оптимізація систем супутникового зв'язку для забезпечення високошвидкісного та стабільного Інтернет-доступу у віддалених районах

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 88,7 % Схожість 11,3 %

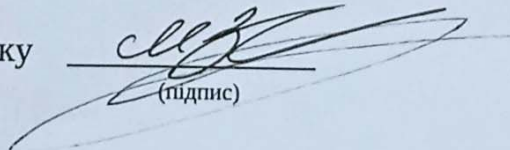
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

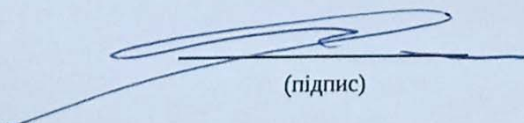
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Кукленко М. С.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.
(прізвище, ініціали)