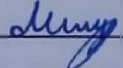
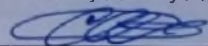


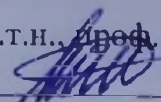
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

 Муха О.В.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ
 Стальченко О.В.

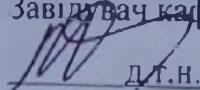
« 11 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС
 Семенов А.О.

« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)

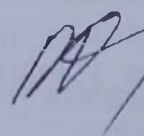
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

 «5» 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Мусі Олександр Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система зв'язку міліметрового діапазону
керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

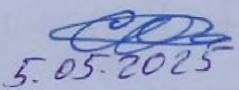
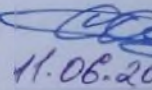
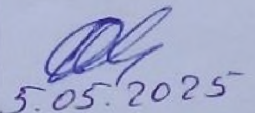
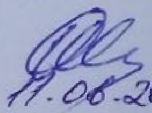
3. Вихідні дані до роботи: тип вхідних сигналів – сигнали даних; режим зв'язку – дуплексний; діапазон частот – 11-12 ГГц; тип модуляції – QPSK, BPSK, APSK; завадостійке кодування – BCH+LDPC.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, сучасний стан та тенденції розвитку систем зв'язку ММДХ, підвищення ефективності роботи систем зв'язку ММДХ, синтез модемів ММДХ на сучасних апаратних платформах, комп'ютерне моделювання модему ММДХ, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Структурна схема блоків DVB-S; Топології мережі ММДХ; результати досліджень завадостійкості різних видів модуляції; структури модемів трактів передачі та прийому; структурна схема модему станцій супутникового зв'язку ММДХ; комп'ютерне моделювання

6. Консультанти розділів роботи

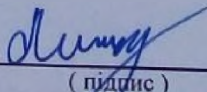
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання
Спеціальна частина	Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 11.06.2025
Охорона праці	Дембінська С.В. проф. канд. БЖДПБ	 5.05.2025	 11.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.
8	Захист БКР	13.06.2025р.

Студент


(підпис)

Муха О.В.

Керівник роботи


(підпис)

Стальченко О.В.

Зміст

ВСТУП.....	2
1.СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	
ММДХ	6
1.1 Аналіз тенденцій розвитку супутникового зв'язку та телерадіомовлення ММДХ.	6
1.2 Аналіз міжнародних стандартів обміну даними в мережах супутникового зв'язку.....	7
1.3 Друге покоління стандарту DVB-S2	12
1.4 Способи організації комунікації в мережах VSAT	19
1.5 Мережі VSAT за топологією «точка-точка»	23
1.6 Мережі VSAT за топологією «зірка»	24
1.7 Мережі VSAT за топологією "кожен з кожним"	27
1.8 Висновки	29
2.ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	
ММДХ	31
2.1 Загасання сигналу в супутниковому радіоканалі діапазону ММДХ.	33
2.2 Використання ефективної багатопозиційної модуляції сигналу	39
2.3 Завадостійке кодування в супутникових каналах зв'язку	43
2.4 Адаптивний підбір сигнально-кодових побудов в залежності від умов поширення сигналу	52
2.5 Адаптація та рандомізація транспортного потоку	56
2.6 Висновки	60
3.СИНТЕЗ МОДЕМІВ ММВХ НА СУЧАСНИХ АПАРАТНИХ ПЛАТФОРМАХ	62
3.1 Структурні схеми трактів передачі та прийому супутникового модему	62
3.2 Архітектура приймального тракту модему	65
3.3 Структурна схема супутникового модему	70
3.4 Висновки	73
4.КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОДЕМУ ММДХ	75
4.1 Моделювання супутникового модему діапазону ММДХ.....	75
4.2 Висновки	78
5.ОХОРОНА ПРАЦІ	79
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	80
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	82
5.3 Пожежна безпека.....	87
ВИСНОВОК.....	91
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	98
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	105

ВСТУП

Актуальність теми дослідження Системи зв'язку міліметрового діапазону, такі як наприклад супутникові (ССЗ) розвиваються швидкими темпами, внаслідок чого частотний ресурс геостаціонарної орбіти в С- і Ku-діапазонах близький до насичення. Тому в даний час освоєння частот Ku-діапазону для супутникового зв'язку, особливо при використанні нових телекомунікаційних технологій є актуальною задачею. Перспективність систем зв'язку міліметрового діапазону обумовлена в першу чергу широкими смугами виділених частот. Це дозволяє використовувати багатопозиційні типи фазової та амплітудно-фазової модуляції з високою спектральною ефективністю (до 7,6 (біт/с)/Гц).

В результаті більш вузької ширини діаграм спрямованості, а також великих коефіцієнтів підсилення антен ММДХ з'являється можливість організації важко детектованих каналів зв'язку і зниження інтерференційних завад. У ММДХ спостерігається зниження вимог до вихідної потужності підсилювача і зниження масогабаритних характеристик репітерів.

Відмінною рисою сучасних мереж супутникового зв'язку ММДХ є перехід на стандарти обміну даними, які регулюють як побудову супутникових модемів, так і мережі в цілому. Стандарти обміну даними є загальновизнаними міжнародними документами, які регламентують режими роботи супутникових цифрових систем передачі сигналу з різними варіантами сигнально-кодових конструкцій.

Важливою розробкою ММДХ є використання багатопроменевої технології HTS (*High Throughput Satellite*) у поєднанні з обробкою сигналу та/або комутацією сигналів на борту. В наслідок чого використання багатопроменевої технології є збільшення еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (ЕІВП) бортових ретрансляторів і зниження необхідної добротності наземних станцій.

У поєднанні з широкою смугою збільшення ЕІВП забезпечує можливість передачі великих обсягів інформації в Ка-діапазоні з високою швидкістю. Використання багатопроменевих антен забезпечує збільшення сумарної пропускної здатності систем до десятків Гбіт/с і знижує вартість приймальних і підсилювальних трактів терміналів за рахунок збільшення ЕІВП, що досягається в точці прийому.

Основним недоліком супутникових радіоканалів Ка-діапазону є їх залежність від метеорологічних умов. Для зниження негативного впливу погодних умов на супутникові радіоканали Ка-діапазону доцільно використовувати адаптивні механізми, які динамічно змінюють швидкість передачі даних, тип кодування, модуляцію і потужність сигналу в залежності від

Модеми сучасних станцій супутникового зв'язку MMBX повинні відповідати вимогам високої завадостійкості і секретності, а також високої швидкості передачі даних. Постійне зростання вимог до завадостійкості та пропускної здатності супутникових модемів MMBX стимулює пошук нових типів енерго- та спектроефективних сигнально-кодових структур та алгоритмів їх обробки.

Важливим напрямком практичного застосування рекомендацій міжнародних стандартів обміну даними є розробка адаптивних уніфікованих модемів з інтеграцією великої кількості режимів зв'язку з можливістю управління режимами роботи станцій, в тому числі з адаптацією під енергію і швидкість передачі.

Актуальність даного дослідження визначається недостатнім вивченням у відомій літературі питань, пов'язаних з реалізацією супутникових модемів з використанням стандартів обміну даними, що дозволяють створювати системи з гнучкою архітектурою, яка може бути змінена за допомогою програмного забезпечення.

Необхідність розробки нових методів і алгоритмів адаптації модемного обладнання систем супутникового зв'язку MMBX до мінливих умов поширення радіохвиль шляхом варіювання режиму роботи і оперативного вибору

сигнально-кодових структур обумовлена недостатнім розвитком таких методів у відомій літературі.

Аналіз останніх досліджень. Теорія і практика стандартів обміну даними в системах супутникового зв'язку є предметом робіт дослідників А.І. Аболіца, В.М. Артющенка, А.М. Сомова, С.Ф. Корнєєва, Альберто Джінезі, Фен-Вень Суна, Лін-Нан Лі, Еммануеля Бутільона, Джун Те Кіма, Гая Лестієвента, Стефано Чіоні та інших.

У відомих роботах [1-5,7] не знайшли належного відображення питання практичного застосування в супутникових модемах рекомендацій загальноприйнятих стандартів обміну даними в частині адаптації за швидкістю передачі даних, типом сигнально-кодових конструкцій (види модуляції і кодування), а також потужності передачі сигналу при зміні метеорологічних умов поширення радіосигналів ММВХ.

Крім того, в літературі мало інформації щодо реалізації модемів вітчизняних супутникових систем ММВХ, які відповідають вимогам сучасних стандартів обміну даними за рівнем завадостійкості, швидкості передачі даних та іншими показниками. Зокрема, це стосується адаптивних модемів, які дозволяють швидко змінювати тип модуляції і швидкість роботи завадостійкого коду для адаптації каналу зв'язку ММВХ до мінливих умов поширення радіосигналу.

Об'єктом дослідження є адаптивні уніфіковані модеми станцій супутникового зв'язку ММВХ.

Предметом даного дослідження є сукупність ефективних методів і засобів підвищення швидкості і надійності передачі даних адаптивних уніфікованих модемів станцій супутникового зв'язку ММВХ.

Метою роботи є підвищення енергоефективності та швидкості передачі даних в модемах станцій супутникового зв'язку ММВХ за рахунок використання завадостійких сигнально-кодових структур на основі багатопозиційних типів фазової та амплітудно-фазової модуляції з адаптацією до типу модуляції, швидкості завадостійкого кодування та потужності сигналу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

1. Порівняльний аналіз міжнародних стандартів обміну даними в мережах ММВХ з метою вибору найбільш прийнятного стандарту.
2. Розробка пропозицій щодо забезпечення високошвидкісної передачі даних в частотних діапазонах Ka/Q з використанням орбітального угруповання спеціалізованих супутників зв'язку на високих еліптичних орбітах.
3. Розробка моделі супутникового каналу діапазону ММВХ з використанням супутників зв'язку на високих еліптичних орбітах.
4. Розробка та дослідження алгоритмів адаптації швидкості передачі даних, типів сигнально-кодових конструкцій (види модуляції а також потужність передавального сигналу при зміні умов поширення сигналу.
5. Дослідження використання сигнально-кодових конструкцій на основі багатопозиційних типів модуляції та завадостійкого кодування PSK і APSK, а також можливості їх уніфікації для модемів мереж супутникового зв'язку.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ММДХ

Даний розділ присвячений аналітичному огляду наукових публікацій [3, 4, 6], присвячених аналізу сучасного стану і тенденцій розвитку систем супутникового зв'язку.

1.1 Аналіз тенденцій розвитку супутникового зв'язку та телерадіомовлення ММДХ.

Аналіз тенденцій розвитку супутникового зв'язку і радіомовлення показує, що він пов'язаний з розширенням можливостей використання нових телекомунікаційних технологій при збереженні спадкоємності з уже розгорнутими наземними мережами супутникового зв'язку і радіомовлення.

У розвитку систем супутникового зв'язку в останні роки намітилася стійка тенденція переходу до діапазону міліметрових хвиль і до багатопозиційних типів фазової, квадратурної амплітудної і амплітудно-фазової модуляції, чому сприяють такі причини:

- освоєння більш високих частотних смуг Ku, Ka і Q;
- багаторазове використання частотного ресурсу за рахунок великої кількості вузьконаправлених променів супутникового ретранслятора;
- збільшення співвідношення потужності до ваги супутникових платформ;
- збільшення пропускної здатності за рахунок адаптивного кодування і модуляції, управління потужністю передавача в залежності від мінливих умов прийому сигналу.

Важливою розробкою ММДХ є використання технології multipath (point beam technology) у поєднанні з обробкою та/або комутацією сигналів на борту (*High Throughput Satellite - HTS*). Багатопроменева технологія, що використовується в Ka-діапазоні, дозволяє збільшити ЕІВП бортових

ретрансляторів і тим самим знизити необхідний Q-фактор наземних станцій забезпечує можливість збільшення сумарної пропускної здатності систем до десятків Гбіт/с при зниженні витрат на термінали.

Ще одним важливим напрямком є надання послуг мобільного широкосмугового зв'язку (VSAT). Серед цих технологій виділяється компанія ArcLight (ViaSat, США), принциповою відмінністю якої є використання сигналів з розширеним спектром (як розширюючі послідовності використовуються ортогональні сигнали) в зворотному каналі, що дозволяє використовувати невеликі антени з високою потужністю для передачі широкосмугових сигналів.

Однією з основних світових тенденцій розвитку індустрії супутникового зв'язку в даний час є створення систем супутникового широкосмугового доступу (broadband access).

1.2 Аналіз міжнародних стандартів обміну даними в мережах супутникового зв'язку.

На відміну від використання комерційної мережі для передачі сигналів телевізійного або радіомовлення, існує потреба в зворотному каналі для організації абонентського зв'язку в мережі Інтернет. При цьому, як правило, пропускна здатність зворотного каналу може бути набагато менше, ніж швидкість передачі інформації в прямому каналі. Необхідність організації зворотних каналів дуплексного зв'язку існує і в системах супутникового зв'язку енергетичного призначення, в тому числі військового.

При використанні супутникової мережі для абонентських терміналів з різними потребами в обсязі обміну інформацією необхідна передача сервісної інформації по кожному окремому абоненту в транспортному потоці. Беручи до уваги можливість використання абонентом зворотного каналу через мережу Інтернет, можна організувати інтерактивну корекцію характеристик інформації, що передається по прямому каналу для кожного окремого абонента. Зокрема, переданий транспортний потік по прямому каналу може містити для цього

абонента інформацію про необхідність зміни ЕІВП його передавального тракту, що може бути використано для компенсації зміни погодних умов в тракті зворотного каналу.

У сантиметровому діапазоні хвиль закріплені спеціальні ділянки радіочастотного спектра для супутникового мовлення. Діапазон частот 11... 12 ГГц є найбільш затребуваним завдяки своїй здатності мати підвищену щільність потоку потужності від супутника-репітера. Для оцінки якості прийому сигналу від супутникового ретранслятора в точці прийому використовується ЕІВП супутника. При цьому ефективно випромінювана ізотропна потужність є добутком вихідної потужності підсилювача потужності супутника-репітера і коефіцієнта підсилення передавальної антени з урахуванням діаграми спрямованості. Як правило, ЕІВП зазвичай оцінюється в дБм або dBW, нормальним значенням вважається 75... 90 дБм. У розглянутих частотних діапазонах типові значення ЕІВП широкомовних супутникових транспондерів становлять від 67 до 82 дБм.

Відмінною рисою супутникового зв'язку є вкрай напружений бюджет радіолінії, який складається з великих відстаней між абонентською станцією і супутником-ретранслятором при його обмеженому енергетичному потенціалі. Ця умова призводить до необхідності використання спеціальних алгоритмів роботи з прийнятими сигналами, адаптованих для роботи з малими відношеннями прийнятого сигналу до шуму. До того, як цифрова модуляція була встановлена в супутниковому зв'язку, використовувалася частотна модуляція, але сьогодні, із застосуванням цифрового мовлення, це використання модуляцій малого порядку, таких як $\pi/2$ BPSK, у поєднанні з розширеним спектром і використання потужного каскадного коду BCH+LDPC як стійкого до перешкод коду.

Ще однією особливістю супутникового цифрового мовлення є використання так званого режиму TDM, в основі якого лежить мультиплексування декількох напрямків зв'язку в часі, що працюють на одній виділеній частоті і, як правило, займають всю ширину магістралі. А це, в свою

чергу, дозволяє підібрати робочу точку підсилювача потужності по відношенню до багаточастотного режиму таким чином, що призводить до збільшення вихідної потужності супутникового репітера до 4 дБ за рахунок відсутності необхідності роботи на лінійній ділянці підсилювача.

Стандарт цифрового супутникового відеомовлення (DVB-S)

Як правило, рекомендації стандарту DVB-S використовуються в якості фізичного рівня для передачі багатоканального мовлення через штучні супутники, будь то відео або радіо, на частотах, виділених фіксованим супутниковим каналам частот Ku-діапазону з можливістю обробки окремими одноканальними приймачами або груповими ресиверами, для багатокористувацького використання. На сьогоднішній день стандартом стали стандарти супутникового мовлення DVB-S і DVB-S2 де-факто по всьому світу і використовуються в якості прямого каналу.

Відповідно до прийнятого в даний час підходу, який має на увазі часове мультиплексування цифрових потоків даних, передавальний тракт будується відповідно до (рисунок 1.1) [5]

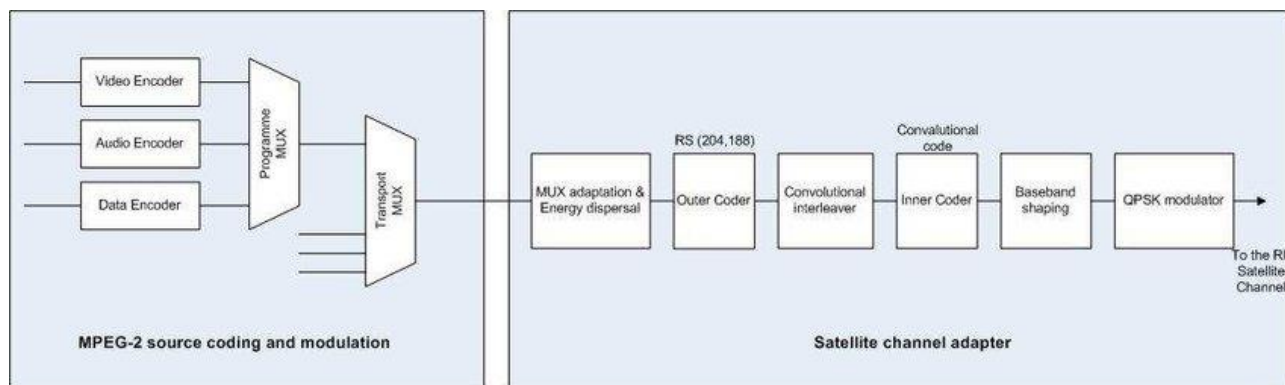


Рисунок 1.1 – Структурна схема передавальної частини стандарту DVB-S

В обладнанні, розташованому на передавальній стороні, необхідно виконати ряд перетворень на цифрових потоках даних з метою узгодження їх з каналом передачі:

- часове мультиплексування потоків передачі даних;

- рандомізація транспортного потоку, який служить для розподілу енергії;
- безшумне небінарне кодування Ріда-Соломона як зовнішнього коду;
- перемежовування розрядного потоку даних за допомогою згорткового перемежовувача;
- внутрішнє кодування за допомогою згорткового коду;
- формуюча фільтрація спектру для отримання стовбуроподібного спектра;
- модуляція.

У цій системі висока завадостійкість під впливом АБГШ, системних завад, а також нелінійність бортового супутникового ретранслятора забезпечується енергоефективною модуляцією типу QPSK разом з потужним завадостійким кодеком на основі добре зарекомендуваної конструкції коду Ріда-Соломона і згорткового коду, декодованого алгоритмом Viterbi за допомогою м'яких рішень з виходу демодулятора.

Використання FEC та узгодженої фільтрації з RRC-фільтром призвело до отримання низької похибки прийому при порогових співвідношеннях сигналу до шуму та сигналу до інтерференційних завад.

Для ефективного використання смуги частот транспондера використовується наступне співвідношення між смугою пропускання транспондера в перерахунку на рівень -3 дБ і шириною спектра сигналу встановлюється рівним 1,28.

На рис.1.2 показана схема потоку даних, яка використовується в стандарті DVB-S для прийому і передачі [6].

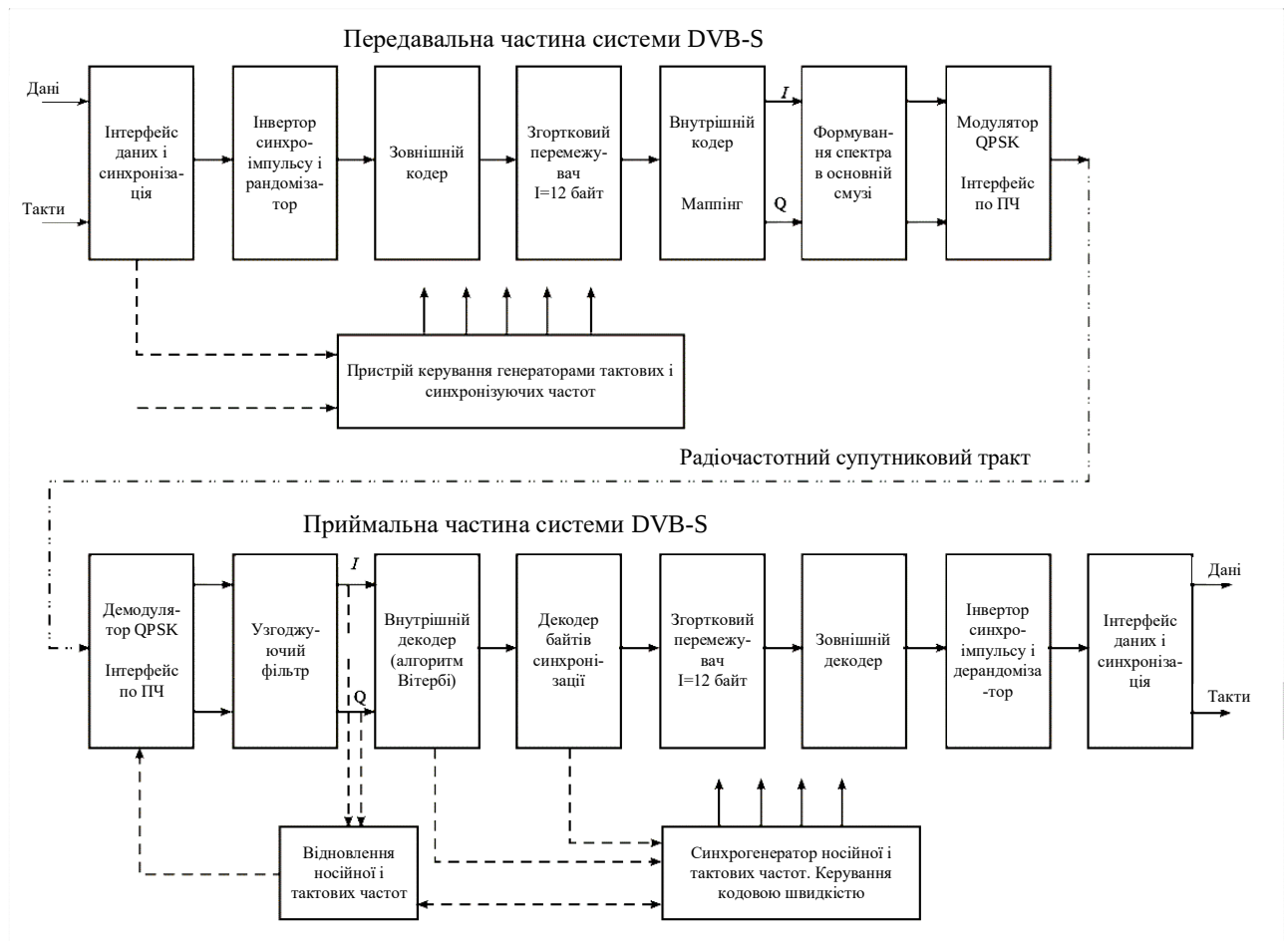


Рисунок 1.2 – Структурна схема блоків адаптації до каналів DVB-S

У супутниковому телебаченні завадостійкість сигналу низька, але використовувані смуги частот (C і Ku) займають відносно широку смугу частот (до 72 МГц). Для підвищення завадостійкості одночасно використовуються два завадостійких коди: код Вітербі і скорочений код Ріда-Соломона - в поєднанні з фазовою модуляцією QPSK, яка є енергоефективною, хоча і має низьку спектральну ефективність (2 біта на символ).

Стандарт DVB-S визначає структуру транспортних пакетів, кодування каналів і схеми модуляції для передачі по супутникових каналах мереж прямого мовлення.

Стандарт DVB-DSNG виконує ті ж завдання для професійних мереж, тобто ретрансляційних точкових мереж і супутникових мереж збору новин. Він відрізняється від DVB-S головним чином тим, що призначений для менш потужних передавачів, які не переводять супутниковий ретранслятор в режим

насичення і тому дозволяють використовувати модуляцію більш високого рівня: 8PSK і 16QAM.

1.3 Друге покоління стандарту DVB-S2

Стандарт DVB-S2 є логічним продовженням розвитку стандартів проекту DVB, доповнюючи і вдосконалюючи спектр послуг і можливостей приймально-передавальних комплексів, що функціонують на основі сімейства протоколів DVB-S і DVB-DSNG [6].

Стандарт призначений для оптимізації супутникового каналу зв'язку. Вона дозволяє збільшити пропускну здатність каналу на 30% при постійній смузі частот за рахунок використання нових конструкцій сигнально-кодових конструкцій, кодування каналів, а також змінних (адаптивних) схем кодування і модуляції. При цьому поліпшуються енергетичні характеристики лінії зв'язку, що дає можливість збільшити зону радіопокриття або знизити технічні вимоги до електромагнітної доступності абонентських терміналів.

Відмінною особливістю системи зв'язку з використанням стандарту DVB-S2 є можливість зміни параметрів сигналу в процесі роботи системи з метою оптимального узгодження змінних параметрів супутникового каналу. При цьому стандарт зберігає спадкоємність з більш ранніми версіями стандартів DVB, а саме:

дозволяє обробляти бітові потоки MPEG, що надходять з виходів мультиплексорів;

підтримує кодування джерел повідомлень і багатопроTOCOLьні вкладення.

Були запропоновані дві нові сигнально-кодові конструкції: 16APSK і 32APSK зі спектральним ККД 2... 5 (біт/с)/Гц і огинаюч. спектра зі ступенем згладжування 0,22. Використовується змінне та покадрове адаптивне кодування та модуляція (AKM). При реалізації інтерактивних додатків стандарт регламентує використання зворотних каналів, наприклад, за стандартом DVB-RCS або DVB-RCS2.

Відповідаючи на питання про повсюдний перехід супутникового модемного обладнання на стандарт DVB-S2, можна відзначити, що не завжди задовольняються системи супутникового зв'язку, побудовані на базі стандарту DVB-S в Ка-діапазоні, на що, як відомо, в більшій мірі впливають погодні умови і в основному опади. Таким чином, виходить, що системи супутникового мовлення в цьому частотному діапазоні вимагають більш високої завадостійкості, ніж в тих же С- і Ku-діапазонах частот. Ще однією причиною розробки нового стандарту стало впровадження абонентських мереж супутникового зв'язку з можливістю надання індивідуальних послуг, чому в свою чергу сприяло впровадження багатопроменевих антен на супутниках-ретрансляторах. Організація таких мереж вимагає великого ресурсу на транспорт, а оптимізація параметрів окремих потоків може бути адаптована під умови прийому кожного з користувачів мережі. Старі стандарти таких можливостей не передбачають.

Для того, щоб стандарт DVB-S2 міг використовуватися в Ка-діапазоні і для використання в ММДХ, було потрібно:

- підвищення ефективності використання виділеної смуги частот, тобто для передачі більшої кількості інформації в смузі стандартного каналу;
- сумісність з попередніми стандартами та способи плавно перейти зі старого парку обладнання на новий;
- диференційований підхід до підбору транспортних параметрів для різних послуг, що передаються в одному каналі.

Для досягнення цієї мети введені нові і більш ефективні кодеки, велика різноманітність типів модуляції, в тому числі з більш високим порядком, а також менші коефіцієнти округлення спектра формуючих фільтрів.

Стандарт DVB-S2 передбачає використання наступних типів модуляції: 32APSK, 16APSK, 8PSK і QPSK. Типи фазової модуляції QPSK і 8PSK призначені для використання в широкомовних супутникових мережах. При цьому підсилювачі потужності транспондерів можуть працювати в режимі, близькому до насичення, так як ці види модуляції не мають на увазі амплітудної

модуляції.

Повторне введення типів модуляції з більш високим порядком, ніж ті, що використовувалися раніше, таких як 16APSK і 32APSK, в першу чергу призначалися для використання в рішеннях односторонньої передачі, таких як телебачення. Використання таких модуляцій має на увазі необхідність оснащення обладнання більш якісними перетворювачами з більш низьким, ніж раніше, фазовим шумом. Обов'язковою умовою ефективного використання передавачів з цими видами модуляції є використання складних передспотворення сигналу. Збільшення позиційності модуляції одночасно збільшує спектральну ефективність системи і одночасно збільшує енергію в каналі для забезпечення прийому з колишньою якістю.

Впровадження нових режимів, таких як VCM (Variable Coding and Modulation) і ACM (Adaptive Coding and Modulation) дозволило організувати гнучкий спосіб формування каналів. VCM дозволяє встановити різний рівень завадостійкості каналу передачі даних, що передаються по одному каналу, ACM дає додаткову можливість адаптувати параметри транспорту до поточних умов прийому даних в конкретній точці прийому. Режим з адаптивним кодуванням та модуляцією призначений для інтерактивних мереж зі зворотним каналом, де абонент має можливість повідомляти на центральну станцію інформацію про умови його прийому групових сигналів від хаба.

Новий стандарт також використовує каскадний код з перемежувачем внутрішнього та зовнішнього коду. Але самі по собі завадостійкі коди відрізняються, і якщо в першому стандарті використовуються РС + НСК, то другий більш потужний на основі БЧХ і НПК.

Використовуваний код низької щільності - це ітеративно декодований код, який був обраний за допомогою математичного експерименту, спрямованого на порівняння декількох варіантів кодів, які відрізняються високою ефективністю, наближаються до межі Шеннона, і в той же час мають зручну для апаратної реалізації структуру. Після процедури завадостійкого кодування НПК розмір кодового слова становить 64800 біт або 16200 біт, кодові слова з більшим

розміром мають більшу завадостійкість в порівнянні з останніми, але в той же час останні можуть бути корисні для рішень, де потрібна менша затримка, наприклад, для роботи з низькошвидкісними каналами. Набір швидкостей коду досить широкий: $9/10$, $8/9$, $5/6$, $4/5$, $3/4$, $2/3$, $3/5$, $1/2$, $2/5$, $1/3$, $1/4$ і дає можливість працювати при малому і великому співвідношенні сигнал/шум з мінімальними втратами. З огляду на наявність порогу насичення похибки, що використовується НПК, використовується інший завадостійкий код БЧХ. Код розрахований на виправлення 12 помилок на одне кодове слово. Стандарт другого покоління був розроблений для передачі різноманітних потоків даних, як пакетно-структурованих, так і безперервних. Коли стандарт DVB-S цього не дозволяв і міг працювати тільки з потоками MPEG-2.

З огляду на те, що стандарт другого покоління може працювати з більш низькими співвідношеннями сигнал/шум, виникла необхідність перегляду системи синхронізації, яка вимагала ведення інформації заголовків як для каналоутворюючого обладнання, так і для демодулятора.

Зміни, яким піддається інформація, полягають в наступному: вхідний бітовий потік розбивається на пакети і доповнюється заголовком з 80 біт, які служать для синхронізації каналоутворюючого апаратури і містять інформацію про тип групового потоку даних, одноканальний або багатоканальний потік даних, режим зі змінною модуляцією або постійною модуляцією її тип, коефіцієнт округлення спектро-формуючого фільтра і інші технічні біти. Розміри пакетів залежать від обраної швидкості кодування.

Після цього інформація, піддана завадостійкому кодуванню і модуляції відповідно до обраного режиму, доповнюється заголовками, призначеними для забезпечення надійної синхронізації як в кадрах, так і в носійній частоті при робочому співвідношенні сигнал/шум. Ці заголовки мають розмір 90 біт і містять інформацію про тип модуляції, використовуваної для подальшої частини інформації, і швидкості виконання безшумного коду. У самому заголовку використовується один тип модуляції. Ця інформація також піддається завадостійкому кодуванню перед передачею по каналу. У зв'язку з необхідністю

роботи з досить низьким співвідношенням сигнал/шум для кодування інформації в заголовку використовується код Міллера з параметрами (64,7). Для відновлення носійної частоти і фази прийнятого сигналу в умовах поганого прийому в структуру переданого сигналу періодично вводять так звані пілотні сигнали. Останньою операцією, яку інформація проходить перед модуляцією, є скремблювання, призначене для надання модульованим символам випадкового характеру.

Введення нових режимів з адаптацією до умов поширення має на увазі, що параметри сигналу можуть змінюватися від кадру до кадру.

При організації схем зв'язку допускається використання декількох носійних, що містять потоки DVB-S2 в межах одного ствола.

Для запропонованих СКК зі стандарту DVB-S2 шляхом математичного моделювання методом математичного моделювання були отримані контрольні точки завадостійкості ($P_{osh} = 10^{-7}$) для каналу з AWGN за наявності ідеальної синхронізації та ідеального прийому. Необхідне співвідношення сигнал/шум становило 0,7 дБ від межі Шенона. Для СКК з використанням модуляції типу FM4 з найпотужнішим із запропонованих запропонованих кодів відношення сигнал/шум склало мінус 2,4 дБ. а для СКК, в якій використовується амплітудно-фазова модуляція порядку 32 і найбільш швидкодіючий завадостійкий код, співвідношення сигнал/шум склало 16 дБ. У зв'язку з впровадженням нових СКК новий стандарт збільшив швидкість передачі даних до 35%, або при тому ж зайнятому діапазоні частот можливий запас енергії до 2,5 дБ.

На рис. 1.3 показані графіки залежності спектральної ефективності від відношення сигнал/шум для каналу з гаусовим шумом (ідеальний демодулятор) для сигналів DVB-S, а також DVB-S2 [7]. Як видно з рисунку, в разі модуляції 32APSK максимально досяжна спектральна ефективність становить близько 4,5 (біт/с)/Гц потенційна пропускна здатність каналу зі співвідношенням сигнал/шум на прийомі.

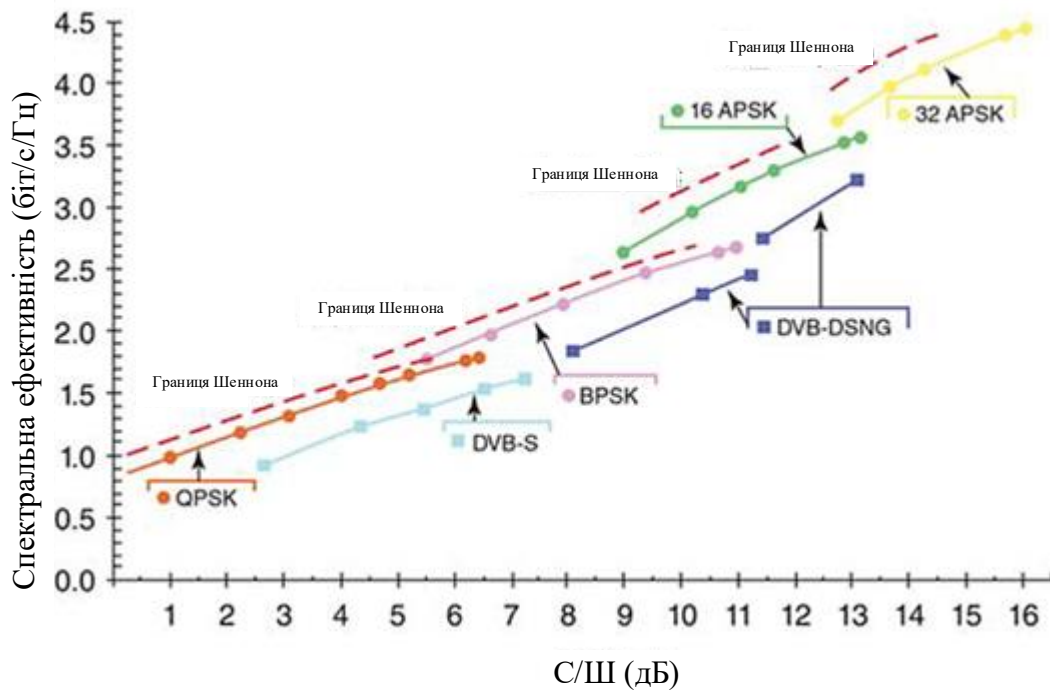


Рисунок 1.3 – Спектральна ефективність як функція відношення сигнал/шум

Розширення можливостей стандарту DVB-S2, DVB-S2H

Стандарт DVB-S2H (а також пов'язаний з ним DVB-SH) є розширенням стандарту DVB-S2 [7]. Крім підвищення продуктивності та ефективності, цей стандарт надає додаткові можливості для роботи ключових додатків DVB-S2, включаючи платформи DTH, розподіл сигналу, VSAT і DSNG.

Крім стандарту DVB-S2, стандарт DVB-S2H додає нові кодові швидкості для 64800 (звичайний) і 16200 (короткий) біт, а також новий розмір блоку 32400 (середній) біт. Новий блок використовується тільки з модуляцією BPSK з кодовими швидкостями 1/5, 11/45, 1/3. Це забезпечує більшу гнучкість у виборі комбінації швидкості передачі інформації, необхідної ймовірності помилки та займаної смуги частот.

Також для підвищення спектральної ефективності стандарт DVB-S2H використовує модуляції з більш високою позиційністю в порівнянні з DVB-S2 – APSK 64/128/256. Це, в першу чергу, корисно не стільки для адаптивного вибору режиму, скільки для прив'язки до конкретних трас. Знову додані сузір'я 8APSK, 64APSK, 64APSK-L, 128APSK, 256APSK, 256APSK-L забезпечують економію

частотного ресурсу при збільшенні швидкості передачі.

Введено ряд режимів роботи (MODCOD) для досягнення співвідношення сигнал/шум мінус 9,9 дБ. Можливе розширення спектру зі спектральною ефективністю лише 0,08. Для роботи при таких низьких коефіцієнтах SNR були введені нові формати кадрів VL-SNR, в яких використовується модуляція $\pi/2$ -BPSK, і тепер можна використовувати розширення спектру за рахунок повторення бітів. Змінена структура фрейму: доданий додатковий заголовок на 900 символів, що дозволяє ресиверу синхронізуватися при низьких коефіцієнтах SNR.

Новий стандарт пропонує до використання так звані суперфрейми, які формуються шляхом об'єднання декількох блоків закодованої інформації довжиною 64800 або 16200 біт в один неперервний кадр. Це зроблено для підвищення стійкості до міжканальних завад, викликаних іншими терміналами, за рахунок використання різних послідовностей скремблювання.

Додано три нові значення коефіцієнта "згладжування" фільтра Найквіста β : 0,15, 0,10 та 0,05, що дозволяє зберегти частотний ресурс космічного апарату. Однак це накладає більш жорсткі вимоги до запасу на лінійність тракту, так як рівень АМ зростає. Вибір конкретної величини має на увазі певний компроміс між цими двома факторами призводить до втрат в SNR: при QPSK $1/2 - 0,2$ дБ; 8PSK $2/3 - 0,3$ дБ; 16APSK $3/4$ і 32APSK $3/4 - 0,5$ дБ.

Таким чином, основні зміни стандарту DVB-S2H пов'язані з модифікацією фізичного рівня і призначені для випадків високих швидкостей (APSK-64/128/256) і передачі інформації в поганих умовах (BPSK з розширеним спектром).

Стандарт DVB-S2H додає сигнально-кодові конструкції для ефективної роботи при дуже низьких і дуже високих відношеннях сигнал/шум (розширені S/N області на рисунку 1.4) [8]. Крім того, DVB-S2H дозволяє використовувати фільтри з меншим коефіцієнтом «згладжування» (до 0,05) і більш тонким підстроюванням сигналу до умов в каналі ММДХ, що підвищує спектральну ефективність системи.

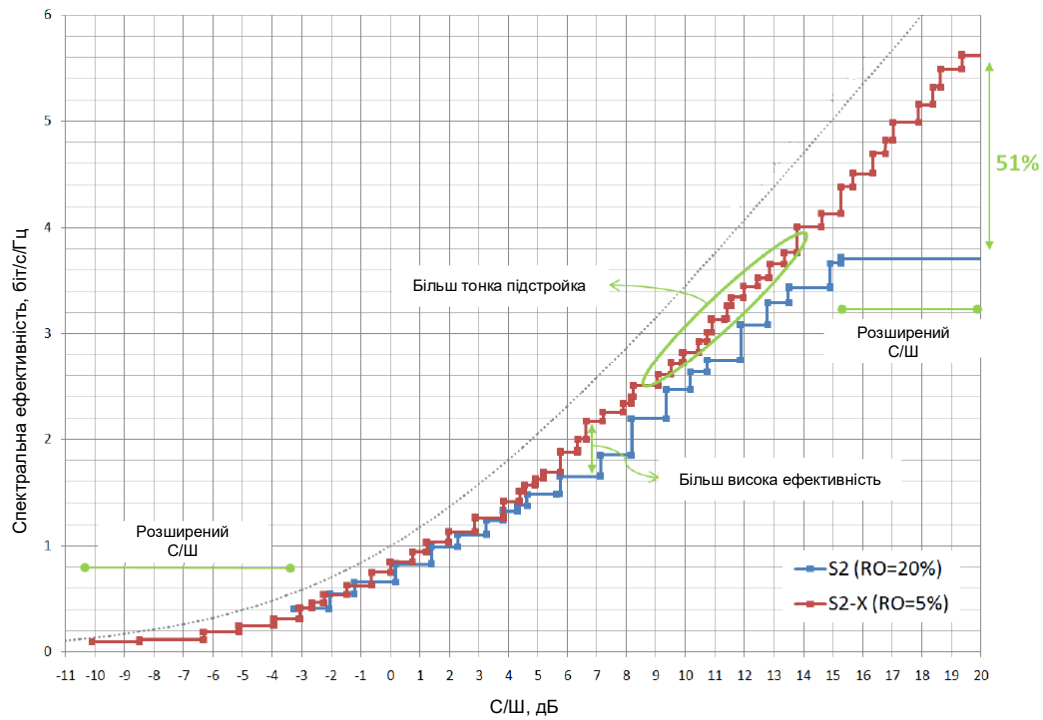


Рисунок 1.4 – Спектральна ефективність стандартів DVB-S2 та DVB-S2H

1.4 Способи організації комунікації в мережах VSAT

Існує три основних варіанти організації зв'язку в мережах VSAT [4]:

мережа «точка-точка» є найпростішим випадком дуплексної лінії зв'язку між двома далекими станціями;

мережа «зірка» – для різноспрямованого радіального трафіку між центром мережі та периферійними (віддаленими) точками зв'язку;

мережа «кожен з кожним» – для прямого з'єднання між будь-якими точками мережі зв'язку.

Космічний сегмент системи супутникового зв'язку є найдорожчою частиною систем супутникового зв'язку, і в цілому забезпечує «скромну» пропускну здатність, з цієї причини рідко буває можливим виділити цілий супутниковий транспондер на одну супутникову службу, не кажучи вже про одного користувача. Хоча такі заявки мають місце, наприклад, для послуг фіксованого зв'язку.

Замість цього пропускну здатність кожного супутникового транспондера

може використовуватися декількома споживачами, і, як правило, кожен з цих споживачів може, в свою чергу, надати доступ великій кількості користувачів до виділеної частини пропускної здатності супутникового транспондера. Метод, за допомогою якого розподіляється ємність і користувачам полегшується доступ до спільного ресурсу, називається множинним доступом. Множинні способи доступу особливо важливі для персональних супутникових систем, де кількість потенційних користувачів значно перевищує доступну потужність транспондера, але не всі користувачі хочуть використовувати з'єднання одночасно.

Коли кілька потоків даних (для кількох користувачів або програм користувачів) використовують один передавач, передача вважається мультиплексованою. Це може стосуватися, наприклад, у разі передавання даних по прямій лінії зв'язку від центрального хаба до кількох терміналів користувача. Однак, якщо кілька потоків даних мають кілька передавачів, яким потрібно спільно використовувати доступ до одного діапазону (і супутникового транспондера), вони зазвичай використовують метод множинного доступу. Як приклад можна навести передачу зворотного каналу від кількох користувачів на центральний вузол.

Ці методи тісно пов'язані між собою, і різниця між мультиплексуванням і множинним доступом в основному залежить від того, чи потрібно приймати кілька незалежних передавачів.

В цілому, мультиплексування буде більш ефективним, оскільки йому не потрібно враховувати час роботи передавача (і доплеровські зсуви частоти). З огляду на схожість, розглянемо методи мультиплексування і множинного доступу разом.

Існує п'ять основних методів мультиплексування/множинного доступу (а також різні їх комбінації): з часовим розділенням (TDMA); частотним розділенням (FDMA); частотно-часовим (MF-TDMA); кодовим розподілом (CDMA); з просторовим розподілом (SDMA); з суміщенням носійних (MDSN-PCMA).

Схеми розподілу ресурсів типу одна носійна на канал або декілька каналів на носійну в режимі мультиплексування SCPC, MCPC використовуються, коли користувачеві мережі потрібна постійна гарантована пропускна здатність каналу. У таких схемах при плануванні комунікацій певний ресурс супутника призначається користувачам на постійний час. Планування зв'язку в таких режимах не представляє складності, але такі схеми малоефективні через те, що супутниковий ресурс не надається іншим користувачам в той час, коли користувач, якому був призначений ресурс, не активний.

У випадках, коли режим SCPC доповнюється множинним доступом за вимогою, супутниковий ресурс може бути наданий великій кількості користувачів на основі їх мережевої активності. Такий режим роботи має на увазі наявність в мережі інфраструктури, спрямованої на оперативне управління ресурсом.

Мультиплексування SDMA спільного використання простору. Виділений спектр повторно використовується в декількох променях, які не перекриваються один з одним і тому не призводять до завад. SDMA практично завжди використовується в комплексі з іншими методами множинного доступу, зокрема FDMA.

Мультиплексування з частотним розділенням FDM і множинний доступ з частотним поділом FDMA. При цьому виділений спектр ділиться на канали FDM/FDMA з меншою пропускною здатністю - по одному на кожного користувача. FDM/FDMA можна поєднувати з іншими методами мультиплексування та множинного доступу, зокрема TDMA. У FDM і FDMA канал ефективно «нарізаний» за частотою, утворюючи кілька каналів, при цьому кожен канал має свою центральну частоту, а канали рознесені таким чином, щоб мінімізувати завади в сусідніх каналах. Канали розташовані таким чином, щоб мінімізувати завади між сусідніми каналами. У випадках, коли канали FDM/FDMA попередньо тимчасово призначені користувачам, схема вироджується в SCPC. Зазвичай необхідно включати так звані захисні смуги сусідніх каналів FDM/FDMA, щоб зменшити ймовірність завад між сусідніми

сигналами, і ці захисні смуги неминуче зменшують смугу пропускання, доступну для корисних сигналів. Принципова відмінність між FDM і FDMA полягає в тому, що відстань між каналами FDMA також повинна враховувати точність частоти передавача і доплерівський зсув, що призводить до збільшення відстані між каналами і, знову ж таки, зниження ефективності ресурсів.

Нижче наведені переваги та недоліки схеми FDMA:

- Переваги: простота в реалізації; не вимагає сигналів синхронізації мережі.
- Недоліки: може бути відносно негнучким (особливо щодо адаптації до мінливих вимог до пропускну здатності і тому часто використовується зі службами комутації каналів з фіксованою швидкістю); неефективне використання потужності при використанні одного супутникового транспондера (вихідна потужність повинна бути зменшена, щоб уникнути надмірного інтермодуляційного «шуму», FDMA не може використовувати максимальну вихідну потужність транспондера).

Недоліки схеми FDMA були усунені з розробкою нової схеми множинного доступу з багаточастотним часовим поділом, яка дозволяє користувачам отримувати доступ до різної пропускну здатності динамічно в часі.

TDM Time Division Multiplexing і TDMA Time Division Multi-Access – це технологія, яка розділяє канал на послідовні часові інтервали (один або кілька часових «слотів») на одного користувача, залежно від виділеної пропускну здатності. Як правило, такі схеми доступу використовуються при побудові мереж з використанням топології «зірка». Висхідний канал використовує технологію TDM, а зворотний канал – TDMA. TDMA може використовуватися в поєднанні з FDMA і SDMA.

Мультиплексування CDM з кодовим поділом і множинний доступ з кодовим поділом CDMA - це технологія, в якій доступ до ресурсу здійснюється декількома користувачами на одній частоті поширення спектру за допомогою різних розширюваних кодів, які є індивідуальними для кожного з користувачів. CDMA може використовуватися в поєднанні з FDMA і SDMA.

1.5 Мережі VSAT за топологією «точка-точка»

Найбільш простим і раннім способом організації зв'язку між користувачами мережі є топологія «точка-точка» (рисунок 1.5) [4].

Перелічимо основні позитивні відмінності мережі супутникового зв'язку, побудованої за технологією SCPC:

- пропускна здатність, закріплена за користувачами;

Вся пропускна здатність каналу використовується однією конкретною наземною станцією, а не розподіляється між багатьма ЗС, як в інших технологіях. Тому пропускна здатність каналу завжди гарантована;

- висока доступність каналу;

Дані, що надходять на вхід модему, передаються на канал негайно; Мінімальна затримка в часі. Дані передаються «в один стрибок» і не «стоять у чергах» на передачу, тому затримка в каналах мінімальна - близько 250 мс;

- автономність;

Мережа супутникового зв'язку «точка-точка» не вимагає централізованого управління. Надійність такої мережі не залежить від роботи центральної станції оператора, кожен напрямок «точка-точка» діє окремо;

- можливість вибору смуги та енергетики;
- ефективне використання частотних та енергетичних ресурсів.

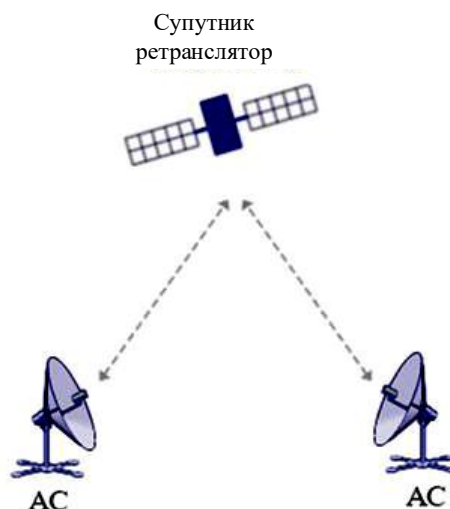


Рисунок 1.5 – Мережа «точка-точка»

Завдяки цим особливостям топологія «точка-точка» найчастіше використовується для організації магістральних супутникових каналів зв'язку: міжміських телефонних каналів, каналів доступу до мережі Інтернет у великих постачальників послуг, для телебачення та радіомовлення.

Цю топологію можна модифікувати в компонування «точка-багатоточка». У цьому випадку вона перетворюється на своєрідну «зірку». В цьому випадку на центральній станції є множина модемів, які дозволяють побудувати досить розгалужену мережу, але вона стає більш складною в налаштуванні і управлінні, ніж мережа з топологією «зірка».

1.6 Мережі VSAT за топологією «зірка»

У конфігурації зірчастої мережі термінали користувача, такі як супутникові телефони або термінали з дуже малою апертурою VSAT, з'єднуються один з одним і із зовнішніми користувачами через велику супутникову земну станцію, яка називається хабом. Значною перевагою конфігурації мережі «зірка» є те, що бюджет каналів полегшується для невеликих терміналів, оскільки вони зазвичай підключаються до центральної станції з великою антеною та високою вихідною потужністю підсилювача і, отже, високими EIRP та G/T.

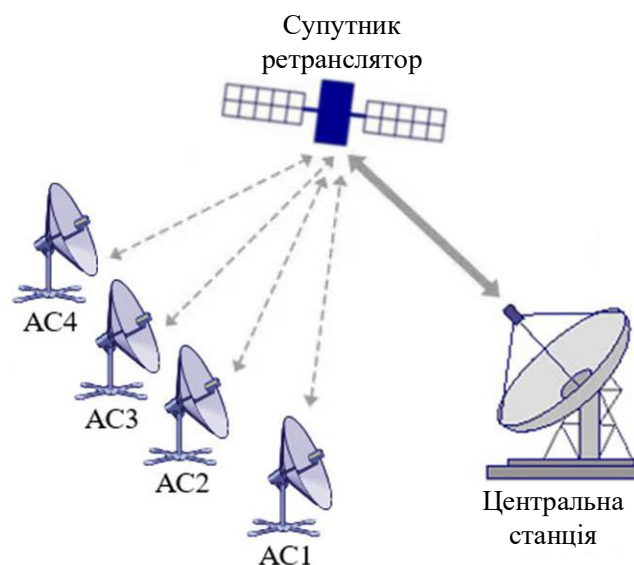


Рисунок 1.6 – Мережа з топологією зірка

Ще одна перевага конфігурації «зірка» полягає в тому, що вся інформація в прямому каналі від центральної станції до кількох користувачів може бути синхронізована і мультимплексована більш ефективно – наприклад, за допомогою технології TDM.

Побудова мереж за принципом типу «зірка» часто використовується в таких схемах зв'язку, де немає необхідності в обміні трафіком між абонентськими терміналами, а основний обмін інформацією здійснюється з центральною станцією або одностороння інформація передається від центральної станції до великої кількості користувачів, а зворотний канал використовується, наприклад, для передачі інформації про прийнятий сигнал. Як правило, в такій системі трафік не симетричний. Використання такої організації має істотний недолік, а саме тривалу затримку в передачі інформації, що виникає в результаті так званого «подвійного стрибка» в разі зв'язку між абонентськими терміналами. У «зіркових» мережах з метою організації доступу до загального ресурсу центральна станція виконує ряд функцій, спрямованих на встановлення зв'язку між абонентськими терміналами, управління організованими каналами, підтримання якості каналів, що надаються в режимах ACM. Висновок абонентських клем для передачі інформації за межі супутникової мережі здійснюється також на центральній станції. Як правило, на центральних станціях встановлюється обладнання (NMS – станція управління мережею і NCC – центр управління мережею) з виконанням обслуговування декількох мереж одночасно.

Інтенсивний розвиток VSAT мереж за топологією «зірка» обумовлений тим, що на базі обладнання VSAT можлива побудова мультимедійних мереж, що забезпечують практично всі сучасні послуги зв'язку: доступ до мережі Інтернет, телефонний зв'язок, об'єднання локальних мереж (побудова VPN-мережі), передача аудіо-відео інформації, резервування існуючих каналів зв'язку, збір даних, віддалене управління промисловими об'єктами та багато іншого. Крім широкого спектру послуг, що надаються, перевагами топології «зірка» рельєфу є: невисока вартість; швидке розгортання; висока якість зв'язку; висока надійність; незалежність від операторів наземних мереж.

Вона вигідно відрізняється від інших схем організації мережевого зв'язку за топологією «Зірка» - це наявність центральної станції з великою антеною, що досягає в діаметрі до 10 метрів, і потужним підсилювачем потужності сигналів для передач. Це дає можливість використовувати компактні антени розміром 0,9 м для абонентських терміналів.

У прямому каналі від центральної станції до абонентів для багатостанційного доступу зазвичай використовується метод часового мультиплексування. Для цього вся корисна інформація, призначена для передачі користувачам, маркується спеціальними маркерами, які однозначно визначають право власності на інформацію конкретним користувачем. Далі ця інформація мультиплексується з службовою інформацією в єдиний агрегований потік, і ця інформація передається через супутник-ретранслятор в зону покриття.

Зворотний канал використовує технологію доступу до спільного ресурсу TDMA в поєднанні з CDMA або FDMA, в залежності від використовуваного обладнання. У таких мережах трафік зазвичай передається у вигляді пакетів, який не має значної чутливості до затримок. У деяких випадках центральна станція за бажанням абонента може надавати і так звані фіксовані канали.

На сьогоднішній день технологія Ethernet стала фактичним стандартом передачі інформації, і більшість користувачів використовують супутниковий інтернет, особливість якого полягає в переважанні обсягу інформації від центральної станції до абонентів над обсягом інформації, що передається по зворотному каналу, що не кращим чином підходить для використання топології мережі типу «зірка». У тих випадках, коли абонентам необхідно забезпечити зв'язок з однаковими швидкостями передачі трафіку в обидві сторони, користувачам призначається певна пропускна здатність на постійній основі. Масштабування такого підходу на всіх користувачів зводить нанівець економічний ефект, отриманий від множинного доступу до загального ресурсу, заснованого на принципах ймовірного трафіку від користувачів. А якщо виникне необхідність, то кількість користувачів в мережі значно скоротиться за рахунок налагодження фіксованих каналів зв'язку.

1.7 Мережі VSAT за топологією "кожен з кожним"

У мережі «кожен з кожним» (рис. 1.7) [4] забезпечуються прямі з'єднання між будь-якими станціями VSAT, розташованими у всіх точках зв'язку. Зв'язок між будь-якими двома станціями в такій мережі встановлюється через супутник в один «стрибок». Схема оптимальна як для телефонних мереж, створених у важкодоступних і віддалених районах, так і для мереж передачі даних з відносно невеликою кількістю віддалених терміналів VSAT. У зв'язку з тим, що VSAT вимагає більше енергетичних ресурсів для роботи між двома невеликими терміналами в порівнянні з мережею «зірка», в мережах «кожен з кожним» абонентським станціям доводиться використовувати більш потужні передавачі і антени більшого діаметру, що істотно впливає на їх ціну. За затримкою поширення сигналу ця топологія схожа на топологію «точка-точка».

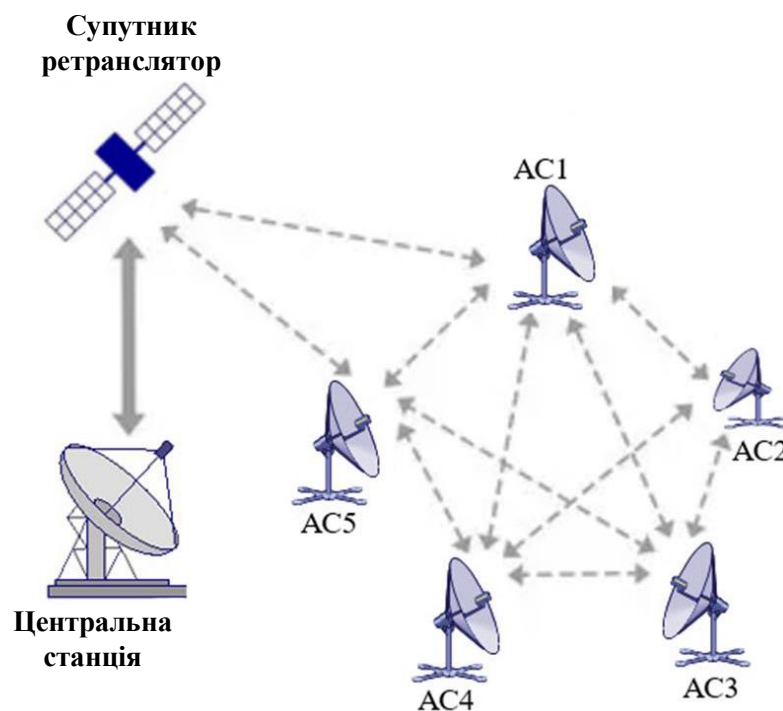


Рисунок 1.7 – Мережа за топологією "кожен з кожним"

Для організації зв'язку в терміналі необхідна наявність двох приймальних модулів (модуляторів) для того, щоб під час сеансу зв'язку виявити вхідний дзвінок з іншого терміналу.

Таким чином, для використання в супутникових мережах можна використовувати рекомендації стандарту DVB-S2 по організації з'єднань в мережах VSAT - «точка-точка», «зірка» і «кожен кожному» з різними типами множинного доступу.

При побудові мереж «точка-точка» і «кожен з кожним» використовується в основному банкомат, який є найпростішим в експлуатації і управлінні. Такий підхід дозволяє будувати мережі з невеликою кількістю терміналів і простою системою управління.

При побудові мереж «зірка» прямий канал працює в режимі SCPC-TDM, а зворотний - в режимі MF-TDMA. При цьому на центральній станції повинна бути реалізована система синхронізації і складна система управління системними ресурсами. Це дає можливість будувати мережі з кількістю абонентів сотнями і тисячами.

Метод доступу CDMA відносно мало використовується в мережах супутникового зв'язку, що може бути пов'язано з труднощами обробки таких сигналів. Але він має перевагу в ММДХ за рахунок використання однієї і тієї ж частоти всіма абонентськими станціями, що в деяких випадках спрощує алгоритми оцінки якості прийнятого сигналу. На відміну від частотного поділу, де ці вимоги пом'якшені. Це ускладнює будівництво такої системи з ММДХ, з огляду на необхідність компенсації втрат на шляху поширення через несприятливі погодні умови.

У ММДХ системі на високих еліптичних орбітах з частотним і кодовим розділенням необхідна компенсація відхилення робочої частоти за рахунок ефекту Доплера. На відміну від ССЗ з часовим розділенням, доплерівський зсув частоти може бути значним.

Для підвищення ефективності використання частотного ресурсу ММДХ може використовуватися у всіх топологіях як самотійно, так і в комплексі з іншими видами множинного доступу. Цей метод дозволяє зменшити смугу частот, займану системою зв'язку, в 2 рази за рахунок використання однієї і тієї ж смуги частот, як в прямому, так і в зворотному напрямку. Компенсатор може

бути реалізований як окремий пристрій, так і як компонент супутникового модему [9].

У разі побудови мереж зв'язку в ММВХ з використанням будь-якої з трьох топологій необхідно враховувати особливості даного діапазону хвиль, зокрема, сильну залежність рівня сигналу від метеорологічних умов. Таким чином, в залежності від розв'язуваної задачі необхідно організувати службовий канал зв'язку, по якому буде передаватися інформація про якість прийому, яка буде використовуватися для підтримки заданої ймовірності бітової помилки на приймальному кінці. Такий канал зв'язку може бути як одностороннім, якщо це мовлення, так і двостороннім, якщо це дуплексне з'єднання.

Алгоритми, які використовуються для прийняття рішення про те, в якому режимі експлуатувати зустрічну станцію, можуть бути досить ресурсозатратними, навіть з використанням нейронних мереж для прогнозування режиму роботи. Це ускладнює і збільшує вартість як абонентських, так і центральних станцій.

1.8 Висновки

1. Аналіз існуючих міжнародних стандартів обміну даними в супутникових мережах показав, що стандарти DVB-S2 і DVB-S2H є найбільш прийнятними для побудови модемів вітчизняних станцій супутникового зв'язку ММДХ.

2. Сигнально-кодові конструкції, рекомендовані стандартом DVB-S2, забезпечують енергоефективність, близьку до потенційної. При ймовірності помилки $BER = 10^{-7}$ пороговий рівень співвідношення сигнал/шум становить від мінус 2,4 до 16 дБ при модуляції QPSK і 32APSK відповідно, що перевищує межу Шеннона всього на 0,7... 1,2 дБ.

3. При побудові супутникових мереж VSAT з використанням топології «точка-точка» і «кожен до кожного» найбільш прийнятним методом є метод множинного доступу CDM. Такий підхід дозволяє будувати мережі з невеликою кількістю терміналів і простою системою управління.

4. При розробці терміналів для мереж супутникового зв'язку з топологією «зірка» доцільно використовувати стандарт DVB-S2 для прямого каналу в режимі SCPC-TDM, а також як варіант реалізації зворотного каналу, стандарт DVB-RCS/RCS2 в адаптивному режимі MF-TDMA.

Для підвищення ефективності використання частотного ресурсу ММДХ технологія MDSN може використовуватися спільно з іншими видами множинного доступу, що дозволяє зменшити частотну смугу, займану системою зв'язку, в 2 рази за рахунок використання однієї і тієї ж смуги частот, як в прямому, так і в зворотному напрямку (з урахуванням особливостей ММДХ).

2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ММДХ

Відмінною рисою сучасних мереж супутникового зв'язку є перехід до стандартів обміну даними, які регулюють як побудову супутникових модемів, так і мереж в цілому. Стандарти обміну даними є загальновизнаними міжнародними документами, які регламентують режими роботи супутникових цифрових систем передачі сигналу з різними варіантами сигнально-кодових конструкцій.

Один з пріоритетних напрямків, що базуються на рекомендаціях стандартів обміну даними, пов'язаний з більш ефективним використанням частотного діапазону в ретрансляційному супутнику, тобто з підвищенням спектральної ефективності використовуваного методу передачі інформації. У більшості модемного обладнання більшості виробників використовується фазова, квадратурна амплітуда і амплітудно-фазова модуляція з позиційним значенням не більше 32, хоча деякі виробники мають модеми з більш високою позиційністю використовуваних модуляцій (до 256).

Підвищення позиційності модуляції дає можливість використовувати меншу смугу частот для передачі того ж обсягу інформації, тобто підвищує спектральну ефективність обраного способу передачі інформації. У той же час підвищуються вимоги до енергії для забезпечення необхідної якості каналу зв'язку, чого можна досягти за рахунок використання більш ефективних методів завадостійкого кодування.

Режими модуляції з високою позиційністю ($M \geq 8$) використовуються при організації зв'язку в системах *VSAT* або по топології «точка-точка», або по топології «зірка» в сигналах центральної станції. Це пов'язано з необхідністю забезпечення підвищених вимог до енергії лінії зв'язку і завадостійкості для багатопозиційних сигналів.

Ще одним способом зменшення смуги пропускання, займаної сигналом, є використання формоутворюючих фільтрів з різним ступенем прямокутності. В

даний час використовуються фільтри з коефіцієнтом згладжування 0,2... 0,35, хоча в деяких випадках може бути знижена до значень 0,05 ..., 0,15 [4].

Ще одним способом більш ефективного використання частотного діапазону є його повторне використання. Carrier Multiple Access Technology (*MDSN, PCMA*) — це метод повторного використання частот для існуючих і запланованих супутників-ретрансляторів, що дозволяє двом або більше земним станціям використовувати один і той же частотний діапазон, слот TDMA або поліном CDMA одночасно.

Використання високочастотних смуг з високою пропускнуою здатністю при ясного небі має на увазі необхідність боротьби з завмираннями, яке в основному викликане атмосферними явищами. Фазовий шум і нестабільність несучої також значно сприяють погіршенню умов прийому.

Вплив цих факторів можна пом'якшити, застосувавши комплекс заходів, включаючи адаптацію параметрів кодування та модуляції, а також керуванням живленням передавача земної станції. Розвиток технологій адаптивного кодування і модуляції, управління потужністю передавача в залежності від мінливих умов поширення і прийому сигналу, вимагають застосування сучасних ефективних методів завадостійкого кодування в сукупності з видами модуляції, призначеними для роботи в супутникових каналах.

Нестабільність опорних генераторів і їх фазовий шум вимагають застосування спеціальних алгоритмів, що реалізують фазову синхронізацію несучого сигналу для різних видів модуляції. У той же час модуляція високого порядку вимагає розробки методів синхронізації в умовах дуже низьких співвідношень сигнал/шум для різних сигнально-кодових конструкцій. Це кадрування сигналу з включенням в данні передачі спеціальних преамбул (заголовків, пілот-символів), а також додаткових опорних символів з низьким індексом модуляції ($M = 2$, $M = 4$) з хорошими кореляційними властивостями. Цей захід дає можливість додатково реалізувати оперативну настройку демодулятора під різні типи сигнально-кодових конструкцій.

Введення в заголовок інформації про тип модуляції і кодування з

однорідною модуляцією і кодування регулярно переривчастими пілотними сигналами сприяє надійній синхронізації приймача по межах кадру, несучої частоти і фази сузір'я сигналу. При цьому обсяг службової інформації визначається кількістю варіантів побудов сигнально-кодових конструкцій і може становити від декількох одиниць до декількох десятків біт.

2.1 Загасання сигналу в супутниковому радіоканалі діапазону ММДХ

Діапазон ММДХ характеризується підвищеним впливом атмосферних збурень (дощ, сніг, хмари, тропосферні сцинтиляції), які призводять до ослаблення радіосигналів, що ретранслюються, і як наслідок, до зниження надійності прийому інформації.

Вплив хмарності і туману на загасання сигналу в смугах Ka/Q невеликий через малі розміри і концентрацію частинок в цих утвореннях (діаметр краплі менше 0,2 мм) і становить менше 1 дБ. Найбільший вплив на сигнал в діапазонах Ka/Q надають опади у вигляді дощу, тоді як сніг і град викликають значно менше загасання. У зв'язку з тим, що інтенсивність дощу може варіюватися від 0,25 мм/год (мряка) до 50 мм/год (сильна злива), загасання сигналу при проходженні через опади є динамічною величиною, на відміну від інших складових загасання, які можна розглядати як статичні величини.

Визначальним фактором, що впливає на рівень сигналу на вході приймача, є втрати енергії при поширенні сигналу по супутниковому радіозв'язку.

Загасання енергії сигналу у вільному просторі, викликане зменшенням щільності потоку потужності на відстані від випромінювача, вираженого в децибелах, визначається співвідношенням [10, 11]:

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

де λ – довжина хвилі, м; d – похила дальність (відстань між передавальною

і приймальною антенами), м.

Розрахунок загасання сигналу у вільному просторі (2.1) для діапазонів Ka/Q при поширенні по каналах КА-ЗС та ЗС-КА відповідно проводився з використанням програмного забезпечення Matlab для наступних умов: $f_{Ka} = 20$ ГГц, $f_Q = 44$ ГГц, кут нахилу антени $\beta = 49,8^\circ$, відстань до високоеліптичної орбіти в апогеї 40000 км. Втрати в Ka і Q -діапазонах становлять 212 і 219 дБ відповідно.

Ослаблення в опадах відбувається за рахунок розсіювання і поглинання частини енергії електромагнітних коливань в частинках води. Загасання радіосигналів пропорційно відносному розміру частинок по відношенню до довжини хвилі, їх концентрації і діелектричної проникності. Дощ має значний вплив на загасання сигналів. Інтегральним параметром опаду, який враховує розмір, концентрацію і швидкість падіння крапель і багато в чому визначає загасання радіосигналів, є інтенсивність дощу (мм/год). Загасання радіохвиль в атмосфері внаслідок дощу залежить від інтенсивності опадів, просторового розташування дощової зони і є випадковою величиною.

Загасання внаслідок опадів розраховується відповідно до рекомендацій, розроблених Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) [12], які дозволяють розрахувати питоме загасання (загасання на кілометр) в залежності від інтенсивності опадів, частоти сигналу, поляризації і кута підйому.

Залежність між лінійним загасанням γ_r (дБ/км) та інтенсивністю опадів r (мм/год) описується виразом

$$\gamma_r = kr^\alpha \quad (2.2)$$

Значення коефіцієнтів k і α в діапазоні від 15 до 50 ГГц в функції частоти f (ГГц) визначаються на основі емпіричних співвідношень:

$$\lg k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \lg f + c_k \quad (2.3)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \lg f + c_\alpha \quad (2.3)$$

Значення констант a_j , b_j і c_j в (3) і (4) наведені в [13]. Графіки загасання сигналу внаслідок дощу (1 км шару дощу), розраховані з використанням (2.2)–(2.4) як функції частоти при інтенсивності дощу 7,5 та 50 мм/год, наведені на рисунках 2.1 та 2.2 відповідно. Величина опадів становить 50 мм/год [14] відповідає сильній зливі. Інтенсивність такого дощу рідко буває тривалою, але може становити до декількох десятків хвилин.

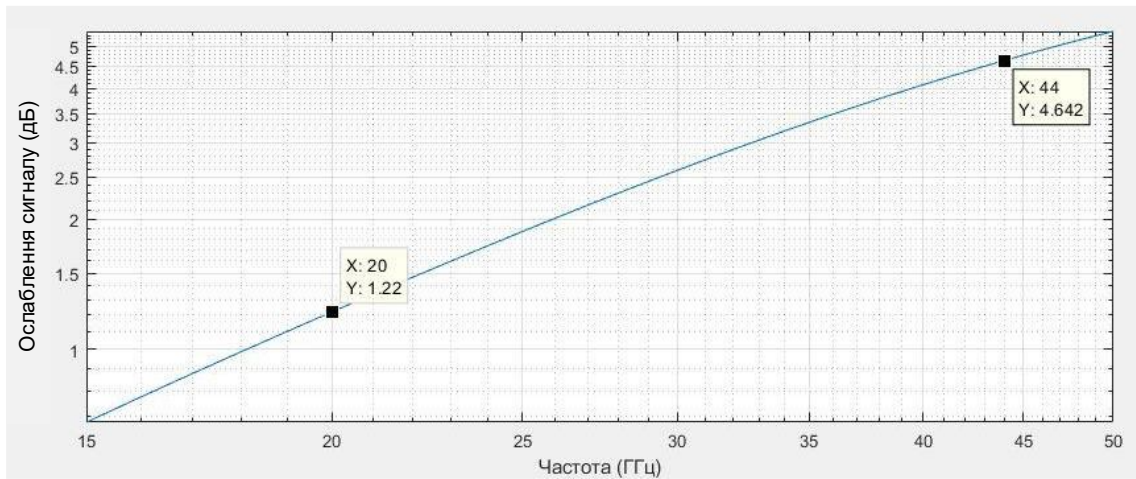


Рисунок 2.1 – Частотна залежність загасання сигналу внаслідок дощу (7,5мм/год)

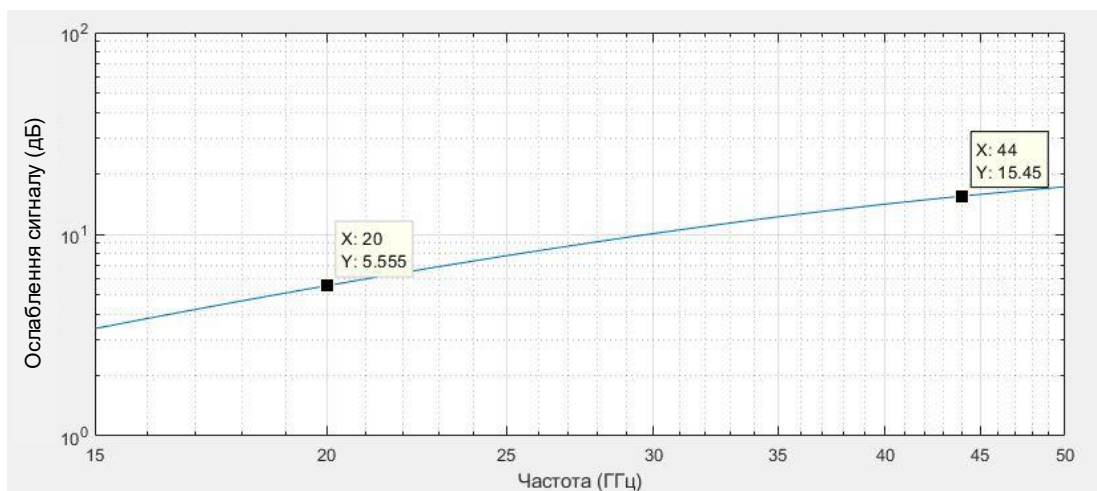


Рисунок 2.2 – Частотна залежність загасання сигналу внаслідок дощу (50мм/год)

Як видно з рисунків, втрати при проходженні через шар дощу в діапазонах Ka і Q склали відповідно 1,2 і 4,6 дБ при інтенсивності дощу 7,5 мм/год, а при інтенсивності дощу 50 мм/год - 5,6 і 15,5 дБ відповідно.

Загасання сигналу в тумані і хмарах залежить від кількості води в одиниці об'єму, а також від температури повітря і частоти сигналу. Загасання розраховується згідно з рекомендаціями, розробленими ІТУ [15], які дозволяють розрахувати питоме загасання в залежності від щільності рідкої води, частоти сигналу і температури. На частотах Ka/Q діапазони для хмар або туману, що повністю складаються з дрібних крапель, зазвичай менше 0,01 см, лінійне загасання (дБ/км)

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T) M \quad (2.5)$$

де K_l – коефіцієнт лінійного загасання за рахунок рідкої води, що міститься в хмарах, (дБ/км)/(г/м³); M — густина рідкої води в хмарах або тумані, г/м³; T - температура рідкої води, що міститься в хмарах, К.

На рис. 2.3 показаний графік загасання сигналу при проходженні через хмари, розрахований за допомогою моделі (2.5) в залежності від частоти для умов: висота хмари 1000 м, щільність рідкої води в хмарі 0,5 г/м³, температура повітря мінус 20°C.

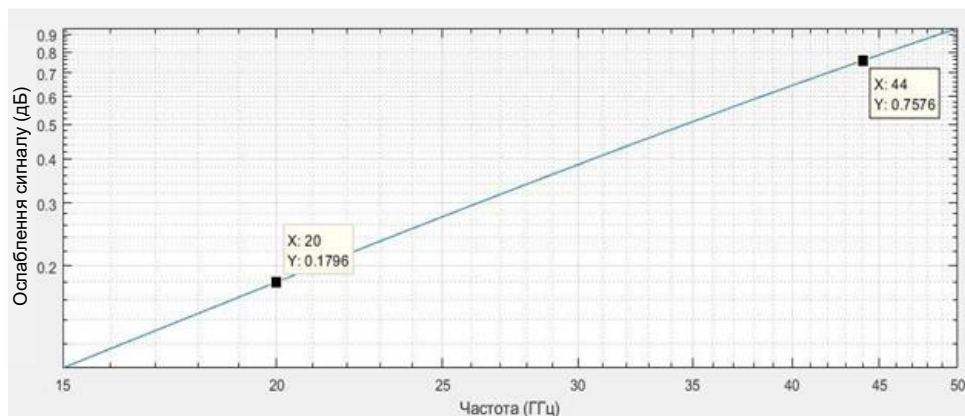


Рисунок 2.3 – Частотна залежність загасання сигналу при проходженні крізь хмари і туман

Як видно з малюнка, лінійні втрати при проходженні через хмари і туман в смугах Ka і Q склали 0,18 і 0,76 дБ/км відповідно.

Загасання сигналу при поширенні атмосферою в першу чергу обумовлено його поглинанням киснем і водяною парою. Загасання розраховується відповідно до рекомендацій, розроблених ІТУ [16], які дозволяють розрахувати питоме загасання в залежності від температури, тиску, щільності водяної пари і частоти сигналу.

Лінійне загасання в газах визначається за формулою

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,182 f(N''_{\text{кисню}}(f) + N''_{\text{водяної пари}}(f)) \quad (2.6)$$

де γ_o та γ_w – лінійні загасання, дБ/км, зумовлені сухим повітрям (киснем, азотом при певному тиску) та водяною парою відповідно; $N''_{\text{кисню}}(f)$ і $N''_{\text{водяної пари}}(f)$ уявні частини частотно-залежних комплексних рефракцій:

$$N''_{\text{кисню}}(f) = \sum_{i(\text{кисень})} S_i F_i + N''_D(f) \quad (2.7)$$

$$N''_{\text{водяна пара}}(f) = \sum_{i(\text{водяна пара})} S_i F_i \quad (2.8)$$

де S_i – інтенсивність i -ї спектральної лінії кисню або водяної пари; F_i – коефіцієнт форми лінії кисню або водяної пари; $N''(f)$ – безперервний спектр для сухого повітря, обумовлений поглинанням азоту при певному тиску.

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] && \text{для кисню} \\ S_i &= b \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp[b_2(1 - \theta)] && \text{для водяної пари} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Інтенсивність лінії визначається за формулою

де p – тиск сухого повітря, гПа; e – парціальний тиск водяної пари, гПа (сумарний барометричний тиск $p_{tot} = p + e$); $\theta = 300/T$; T – температура, К. Значення спектроскопічних коефіцієнтів a_1 , a_2 , що входять в (2.9) для визначення

частоти загасання за рахунок кисню, наведені в таблиці 1, а коефіцієнти b_1 , b_2 , для водяної пари наведені в таблиці 2 [16].

На рисунку 2.4 наведено графік частотної залежності загасання сигналу через атмосферні гази для частот від 15 до 50 ГГц, розрахований за моделлю (2.6)–(2.9), для умов: тиск сухого повітря на рівні моря $101,325 \times 10^5$ кПа, щільність водяної пари 7,5. Температура повітря 20°C .

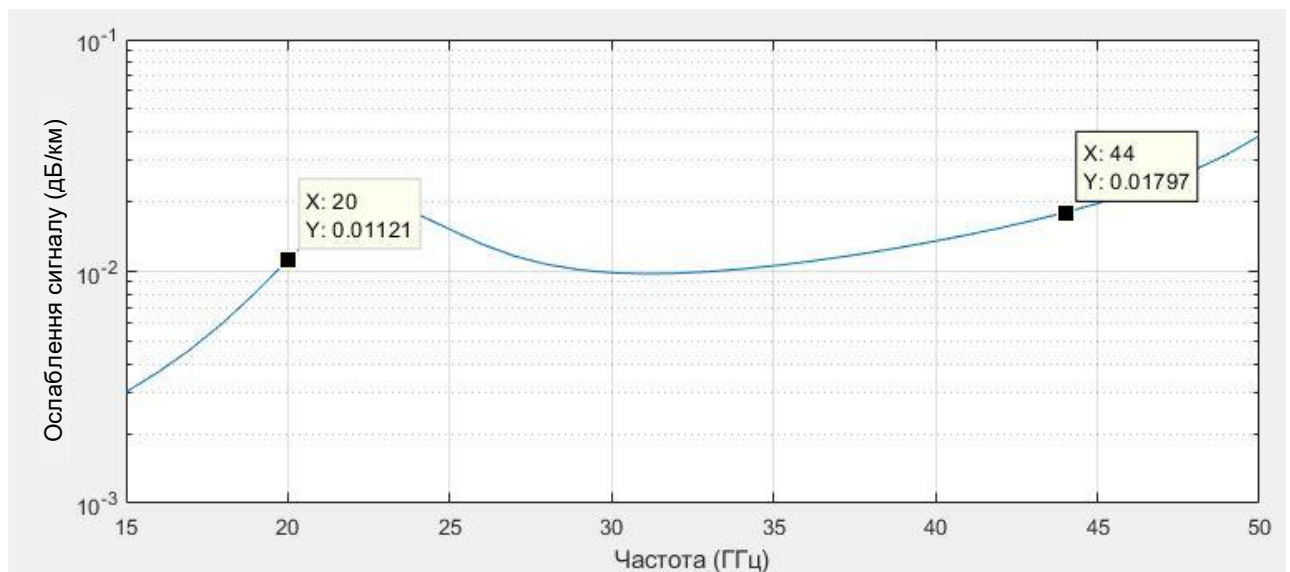


Рисунок 2.4 – Частотна залежність загасання сигналу при проходженні через атмосферні гази.

Як видно з рисунку, загасання сигналу при проходженні через атмосферні гази в діапазонах Ka і Q склало 0,011 і 0,018 дБ/км відповідно.

Сумарне загасання при поширенні сигналу від земної станції до космічного корабля і від космічного корабля до ЕС визначається з урахуванням всіх складових, зазначених у пунктах 1-5, і для найгірших умов (при інтенсивності дощу 50 мм/год) і становить:

$$L_Q = 219 + 15,45 + 0,75 + 0,02 = 235,22 \text{ дБ}$$

і

$$L_{Ka} = 212 + 5,55 + 0,17 + 0,01 = 218,31 \text{ дБ}$$

Відповідно.

Всі складові загасання сигналу, крім ослаблення опадів, класифікуються як статичне загасання і визначаються як $L_{st_Q} = 219,77$ і $L_{st_Ka} = 212,76$ дБ. Загасання сигналу через опади є динамічною змінною, яка змінюється від 0 до 15,45 дБ в залежності від інтенсивності дощу.

Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що загасання сигналу в супутниковому радіоканалі Ka/Q -діапазону адекватно описується моделлю квазістаціонарного каналу з прямою видимістю та динамічним загасанням залежно від інтенсивності дощу [17].

2.2 Використання ефективної багатопозиційної модуляції сигналу

Даний розділ присвячений аналізу ефективних видів модуляції сигналу для мереж супутникового зв'язку, а також розробці відповідних рекомендацій щодо поліпшення параметрів супутникових модемів ММДХ.

Вибір типу модуляції і параметрів сигналу супутникових модемів ММДХ вимагає всебічного аналізу різних альтернатив, як з урахуванням можливостей поліпшення основних характеристик ККС, так і технічних обмежень, пов'язаних з реалізацією оптимальних алгоритмів прийому, демодуляції і декодування сигналів. Види модуляції сигналів в мережах супутникового зв'язку повинні відповідати вимогам високої завадостійкості і спектральної ефективності при певній нечутливості до нелінійності тракту. Стійкість або енергетична ефективність характеризується пороговим відношенням енергії розряду сигналу до спектральної щільності шумової потужності E_b/N_0 при необхідній ймовірності P_b помилкового прийому біта інформації. Спектральна ефективність оцінюється як відношення швидкості передачі інформації до смуги пропускання каналу R/W і вимірюється в (біт/с)/Гц.

При різних умовах неминучий вибір між цими взаємопов'язаними параметрами: або забезпечити задану ймовірність помилки при дефіциті потужності, жертвуючи в якійсь мірі смугою, або зберегти займану смугу пропускання з прийнятною ймовірністю помилок. Ці компроміси досягаються

застосуванням різних видів модуляції, що регламентуються стандартом цифрового супутникового відеомовлення *DVB-S* і його модифікаціями *DVB-S2* і *DVB-S2X* [7].

Стандарт *DVB-S* використовує багатопозиційну фазову модуляцію (*QPSK* і *8PSK*) і квадратурну амплітудну модуляцію (*16QAM* і *32QAM*), а також « $\pi/2$ бінарну фазову модуляцію ($\pi/2$ -*BPSK*)», яка використовується для преамбули кадру. Стандарт *DVB-S2* відрізняється від *DVB-S* тим, що в ньому використовується амплітудна фазова модуляція замість квадратурної амплітудної модуляції (*16APSK* і *32APSK*).

$\pi/2$ -*BPSK* модуляція - це квадратурна модуляція без переходів до π , в якій *Q*-компонент є звичайною *BPSK*, а *I*-компонент відрізняється від *Q*-компонента тим, що парні символи вихідної інформації інвертуються. Це виключає фазові переходи на π і полегшує пошук синхронізації кадрів. модуляції " $\pi/2$ -*BPSK*", сузір'я є чотирьохточковим і може бути демодульоване як і в традиційних *QPSK* з тими ж характеристиками завадостійкості [18].

Квадратурна фазова модуляція *QPSK* має таку ж завадостійкість, як і *BPSK*. Багатопозиційні сузір'я ($M > 4$) програють в завадостійкості, при цьому економиться частотний ресурс, що важливо при високій швидкості потоку інформації.

Квадратурна амплітудна модуляція типів *16QAM* і *32QAM*, що використовується в стандарті *DVB-S*, вимагає лінійного тракту, тому в стандарті *DVB-S2* вона замінена амплітудно-фазовою модуляцією *16APSK* і *32APSK* відповідно, яка має більш низький піковий коефіцієнт *PARP* (відношення пікової потужності сигналу R_{pik} до середньої потужності P_{cp}) і допускає менш жорсткі вимоги до лінійності тракту.

Піковий коефіцієнт залежить як від конфігурації сузір'я, так і від коефіцієнта згладжування фільтра Найквіста, що формує спектр сигналу β (табл. 2.1) [16].

Таблиця 2.1 – Піковий коефіцієнт в залежності від коефіцієнта округлості β

β	$PARP$, дБ
0,15	6,3
0,2	5,6
0,3	4,5
0,4	3,5
0,5	2,8

У таблиці 2.2 наведені параметри модуляції для різних сузір'їв сигналів: значення пікового коефіцієнта (без обмеження спектру) і відношення сигнал/шум на біт (з імовірністю бітової помилки $P_b = 10^{-6}$) [11].

Таблиця 2.2 – Параметри модуляції сузір'їв

Тип модуляції	$PARP$, дБ	E_b/N_0 , дБ при $P_b = 10^{-6}$
<i>BPSK, QPSK</i>	0	10,5
8PSK	0	13,8
16PSK	0	18,0
16QAM	2,56	14,4
16APSK (4 + 16)	1,065	15,5
32QAM	2,3	16,0
32APSK (4+12+16)	2,06	17,4

Як видно з таблиці 2.2, в порівнянні з *BPSK* і *QPSK*, які мають однаковий імунітет, багатопозиційні модуляції поступаються їм по завадостійкості. Втрати енергії пропорційні числу положень модуляції M і становлять 3,3 і 6,9 дБ відповідно для 8PSK і 32APSK.

У порівнянні з багатопозиційними модуляціями ($M \geq 16$) *BPSK*, *QPSK* і 8PSK мають більш низький піковий коефіцієнт (нуль без обмеження спектра). Це пов'язано з тим, що всі точки цих сузір'їв лежать на одному колі.

Смуга частот, яку займає спектр сигналу, визначається як $W \approx (1 + \beta) R_s$, де $R_s = R / \log_2 M$ - символна частота. Отже, спектральна ефективність $R/W = \log_2 M / (1 + \alpha)$ вона зростає зі збільшенням числа положень модуляції M і зменшенням β коефіцієнта «згладжування». Це дозволяє економити частотний ресурс, що важливо при високій швидкості інформаційного потоку.

Однак прагнення до економії частотного ресурсу (вибір меншого значення β) вимагає більшого значення відступу робочої точки нелінійного підсилювача від точки його насичення і, отже, призводить до втрат енергетичного ресурсу.

Отриманий піковий коефіцієнт формується шляхом підсумовування значень, наведених у таблицях 2.1 і 2.2. Наприклад, у таблиці 2.3 наведено сумарне значення $PARP_{\Sigma}$ залежно від коефіцієнта β "згладжування" для режимів модуляції 16APSK і 16QAM.

Таблиця 2.3 – Сумарний піковий коефіцієнт в залежності від β

β	$PARP_{\Sigma}$, дБ – 16APSK	$PARP_{\Sigma}$, дБ – 16QAM
0,15	6,851	8,206
0,2	6,254	7,798
0,3	5,268	6,781
0,4	4,278	5,926
0,5	3,864	5,340

Результати таблиці 2.3 показують, що при рівній кількості позицій M результуючий піковий коефіцієнт для модуляції $APSK$ менше, ніж для QAM . Тому в разі обмеження пікової потужності $APSK$ більш ефективно використовує потужність вихідного каскаду (підсилювача потужності) передавача. З цієї причини $DVB-S2$ використовує режими модуляції 16APSK і 32APSK замість 16QAM і 32QAM в стандарті $DVB-S$.

Дані таблиці 2.3 дозволяють оцінити необхідне значення запасу лінійності від точки насичення підсилювача потужності передавача і відповідну зміну вихідної середньої потужності і, відповідно, коефіцієнта корисної дії передавача.

Вплив нелінійності каналу на завадостійкість можна оцінити з графіків рисунка 2.5, на яких показані залежності ймовірності помилки від енергії радіолінії E_b/N_0 для модуляцій типів 16QAM і 16APSK з коефіцієнтом згладжування $\beta = 0,35$. З графіків рис.2.5 видно, що в разі 16APSK досяжна середня потужність (початок переходу кривих на плоску ділянку) при деякій залежності нелінійності підсилювача потужності становить приблизно 1...2 дБ більше. Це дає можливість отримати максимальну мінімальну ймовірність помилок на 1-2 порядки менше, ніж для 16QAM.

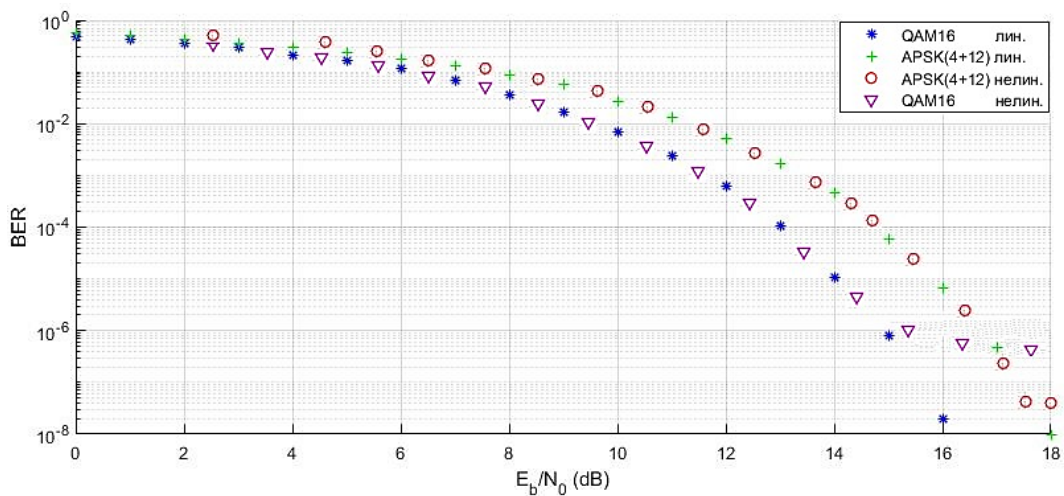


Рисунок 2.5 – Вплив нелінійності каналу на завадостійкість ($M=16$)

Режими модуляції 16APSK і 32APSK вимагають більш якісного радіоканалу і більш складних методів компенсації спотворень сигналу в радіоканалі (наприклад, еквалайзери), ніж BPSK, QPSK і 8PSK. Однак у зв'язку з високою спектральною ефективністю амплітудно-фазової модуляції типів 16APSK і 32APSK їх доцільно використовувати для передачі високошвидкісної інформації при наявності необхідної енергії радіолінії.

2.3 Завадостійке кодування в супутникових каналах зв'язку

Високій надійності передачі даних сприяють програмні та апаратні засоби модему, які дозволяють підтримувати прийнятну ймовірність помилково

переданих бітів (*Bit Error Rate* – *BER*) за рахунок використання кодів, що виправляють помилки.

Відповідно до теореми Шеннона, існує завадостійкий код, що дозволяє передавати потік по гауссовському шумовому каналу з довільно малою надмірністю і як завгодно високою надійністю [18].

Згідно з формулою Шеннона [18], для отримання максимальної смуги пропускання необхідно використовувати весь доступний діапазон частот:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) \quad (2.11)$$

де C – смуга пропускання, W – смуга частот радіоканалу, $P_c/P_{ш}$ – це співвідношення сигнал/шум у перерахунку на потужність.

Швидкість передачі R в реальному каналі нижче, ніж його пропускна здатність. Згідно з формулою (2.11), надійна передача даних зі швидкістю R по каналу Гаусса зі смугою W можлива тільки при дотриманні умови

$$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2^{R/W} - 1}{\frac{R}{W}}, \quad (2.12)$$

де $E_b = P_c/R$ – енергія одного інформаційного біта; R/W – спектральна ефективність. Права частина формули (2.12) визначає так звану «границю Шеннона».

У разі модуляції *BPSK* ($M = 2$) спектральна ефективність $R/W = d \log_2 M = d$, тобто чисельно дорівнює швидкості завадостійкого коду. Тоді, відповідно до (2.12) при $d = 1/4$, відношення енергії сигналу на один біт інформації до щільності одностороннього спектрального шуму E_b/N_0 в каналі не може бути менше мінус 1,2 дБ (границя Шеннона).

До недавнього часу в модемах супутникового зв'язку в якості

завадостійких кодів найчастіше використовувалися згорткові коди, в тому числі в поєднанні з кодами Ріда-Соломона. Зовсім недавно стали використовуватися блокові турбо-коди (*TPC*) і згорткові турбокоди (*TCC*), а також коди перевірки парності низької щільності (*LDPC*). Відмінною особливістю турбокодів є принцип їх розшифровки. Інші завадостійкі коди можуть працювати тільки з бітовими послідовностями, які перевіряються за допомогою контрольних алгебраїчних виразів із суворою оцінкою їх дійсності. Алгоритм пошуку кодових слів, які точно відповідають контрольним виразам, може бути різним.

У випадку з турбокодами декодування починається на рівні демодулятора. При цьому однозначна розшифровка кодового слова, що несе символ, замінюється його імовірнісною оцінкою, яка враховується при переборі кодових послідовностей.

Крім того, методи кодування турбокодів добре підходять для реконструкції довгих послідовностей коду. Для цього виконується множина ітерацій, кожна з яких базується на найбільш надійній версії послідовності коду, отриманої з попередніх ітерацій.

Завдяки кращому використанню інформації про стан сигналу та можливості ефективного ітеративного декодування дуже довгих послідовностей, турбокоди дуже близькі до межі Шеннона (2.12).

Сучасні турбо-коди і *LDPC* забезпечують виграш в енергії до 4,0 дБ в порівнянні з раніше використовуваними кодами. Це дозволяє знизити вартість супутникового терміналу за рахунок використання антен меншого розміру і передавачів меншої потужності без істотного зниження якісних характеристик каналу.

Завадостійкі *LDPC*-коди забезпечують більш високу енергоефективність, ніж турбокоди, але поступаються їм за часом декодування. Тому більшість виробників запропонували широке розмаїття *LDPC*-кодів з необхідною корекційною здатністю і затримкою декодування, придатних як для мереж передачі даних з пакетним навантаженням, так і для критичних для поширення додатків.

У таблиці 2.4 наведені характеристики стійкості і затримки обробки деяких кодів для модуляції *QPSK* [4].

Таблиця 2.4 – Характеристика завадостійких кодів

Код	E_b/N_0 , дБ при BER= 10^{-6}	E_b/N_0 , дБ при BER= 10^{-8}	Затримки обробки, мс
<i>HCK</i> 1/2	5,5	6,8	9
<i>HCK</i> 1/2 + <i>RS</i>	4	4,3	266
<i>CCK</i> 1/2	4,6–5,5	5,8–6,8	74
<i>CCK</i> 1/2 + <i>RS</i>	4,3	4,5	522
<i>TPC</i> 21/44	2,9	3,3	41
<i>LDPC</i> 1/2	1,8	1,9	198
<i>Versa FEC</i> 0,533	2,1	2,2	53
<i>ULL</i> 0,493	3	3,4	19
<i>HCK</i> 3/4	7	8,3	
<i>CCK</i> 3/4	5,3–6	6–6,8	
<i>TPC</i> 3/4	3,3	4	47
<i>LDPC</i> 3/4	2,7	2,8	248
<i>Versa FEC</i> 0,706	3,1	3,3	62
<i>ULL</i> 0,734	4	4,5	23
<i>HCK</i> 3/4 + <i>RS</i>	4,8	5,3	
<i>HCK</i> 7/8	8	9,3	
<i>CCK</i> 7/8	7,1	7,8–8,6	
<i>TPK</i> 7/8	4,2	4,3	245
<i>HCK</i> 7/8 + <i>RS</i>	6,2	6,7	

Аналіз даних таблиці 2.4 показує, що сучасні турбокоди і коди *LDPC* мають перевагу перед раніше використовуваними кодами. Енергетичний вииграш становить 2,5...3,5 дБ для кодової швидкості 1/2 і 3,5... 4,0 дБ для кодової швидкості 3/4 і 7/8.

У процесі ітеративного декодування турбокодів виконується кілька ітерацій декодування, кожна з яких декодує кожен зі складових кодів. Практичне застосування знайшли такі алгоритми декодування, як Log-MAP (LM), Max-Log-MAP (MLM) і Soft Output Viterby Algorithm (SOVA). Складність реалізації цих методів з точки зору числа виконуваних операцій з декодування одного інформаційного символу представлена в таблиці 2.5 [23].

Таблиця 2.5 – Складність алгоритмів декодування

Тип операції	Алгоритм Вітербі	Max-Log-MAP	Log-MAP	SOVA
Вибір максимуму		$5 \cdot 2^{K-1} - 2$	$5 \cdot 2^{K-1} - 2$	$2^{K-1} + 3K$
Підсумовування	$2 \cdot 2^{K-1} + 5$	$10 \cdot 2^{K-1} + 11$	$15 \cdot 2^{K-1} + 9$	$2 \cdot 2^{K-1} + 8$
Множення на ± 1		8	8	8
Порівняння	2^{K-1}			$6K$
Пошук в таблиці			$5 \cdot 2^{K-1} - 2$	
Примітка – K визначає довжину конструкції складових кодів.				

Знаючи кількість виконаних операцій по розшифровці складових N_{cost} кодів, можна оцінити складність розшифровки всього турбокоду:

$$N_{турбо} = IN_{склад} M,$$

де I - число ітерацій декодування;

M - число складових кодів (зазвичай два).

Основним недоліком турбо-кодів є відносно висока складність їх практичної реалізації. Наприклад, складність алгоритму декодування SOVA приблизно в 2 рази перевищує складність звичайного алгоритму Viterbi. Враховуючи, що при декодуванні турбокоду існує близько 10 ітерацій декодування, кожна з яких декодує два компоненти коду, виходить, що складність турбо-коду приблизно в 40 разів більша в порівнянні з декодером

Viterbi. більш ефективні алгоритми *Max-Log-MAP* і *Log-MAP*, різниця в складності збільшується в кілька разів. До недоліків турбокодів можна також віднести наявність так званої області насичення ймовірності помилки, в якій швидкість зниження ймовірності помилки при збільшенні відношення сигнал/шум значно сповільнюється.

Декодування LDPC використовує алгоритм поширення довіри (також відомий як сума-добуток) і його апроксимацію, алгоритм *minsum*. У *DVB-S2* декодування ґрунтується на алгоритмі мінімальної суми. У цьому алгоритмі використовуються прості функції порівняння та додавання. У кодах використовується ітераційне декодування, в основі якого лежить ітераційний обмін м'якими рішеннями між бітовим і тестовим вузлами кодового графа.

На рисунку 2.6 наведені графіки ефективності декодування LDPC і *n*-довжині турбокодів з кодовою швидкістю 1/2. Наведено графіки ймовірності помилки на біт *BER* у порівнянні з відношенням сигнал/шум (енергія сигналу на інформаційний біт до односторонньої спектральної щільності шуму E_b/N_0).

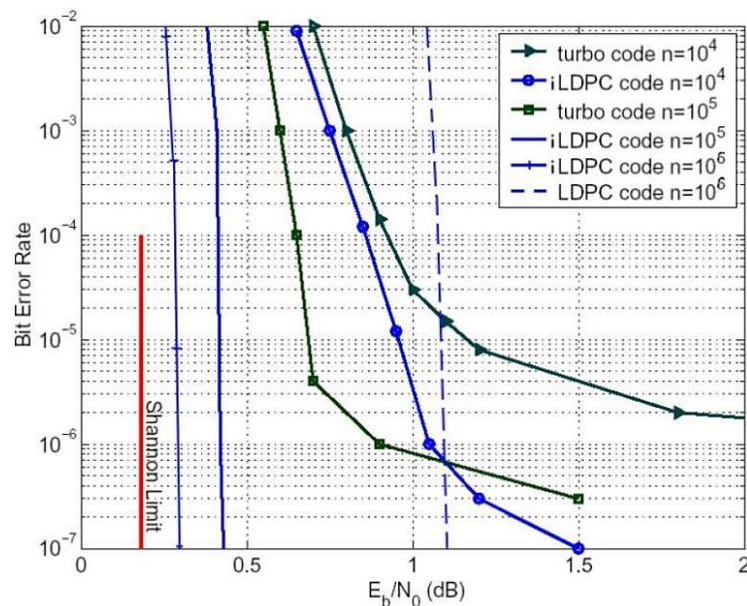


Рисунок 2.6 – Ефективність розшифровки LDPC і Turbo кодів

Як видно з рисунку, ефективність нерегулярних кодів LDPC (кривих *iLDPC*) вище, ніж регулярних кодів. Це пов'язано з тим, що в нерегулярних кодах, через різну кількість одиниць в рядках і стовпцях, інформаційні символи захищаються по-різному.

З порівняння характеристик турбокодів і кодів LDPC випливає, що останні виявляються більш ефективними, що особливо помітно при великій довжині коду і низькій ймовірності помилки декодування. При цьому складність практичної реалізації кодів LDPC значно нижча, ніж у турбокодів:

$$N_{LDPC} = 4I_s$$

де I - число ітерацій декодування; s - середня вага стовпців тестової матриці.

Особливістю турбокодів і LDPC кодів є їх блокова структура і досить велике значення довжини кодового слова, яке може досягати значення в десятки тисяч біт. За рахунок такого значення кодового слова і ітеративного процесу декодування, в якому кількість ітерацій може доходити до декількох десятків, досягається необхідна здатність до корекції.

Це досягається за рахунок значного збільшення тривалості декодування, яка може досягати сотень мілісекунд, що можна порівняти з тривалістю поширення сигналу від терміналу до супутника-репітера і назад - 250 мс. При передачі пакетного трафіку по супутниковій лінії зв'язку - пакетів, що містять інформацію з інтернету, такі затримки не критичні для користувача. Але при організації відеоконференцій, телефонних дзвінків, де використовується режим реального часу, це стає критичним - співрозмовникам доводиться чекати, поки інформація дійде до адресата, що може статися за кілька секунд.

Для вирішення проблеми побудови каналів зв'язку з різними вимогами до декодування затримок і завадостійкості, ряд виробників обладнання запропонували велику кількість різновидів LDPC-кодів з різною довжиною коду (від 256 до 64000 біт), швидкістю коду ($1/2 - 19/20$) і можливістю корекції.

На малюнку 2.7 і в таблиці 2.6 показані характеристики завадостійкості для різних модуляцій і швидкостей кодів LDPC (стандарт DVB-S2) і кодів 3GPP2 стандарту супутникового цифрового телевізійного мовлення для мобільних пристроїв (DVB-SH) на короткий кадр в 16200 біт.

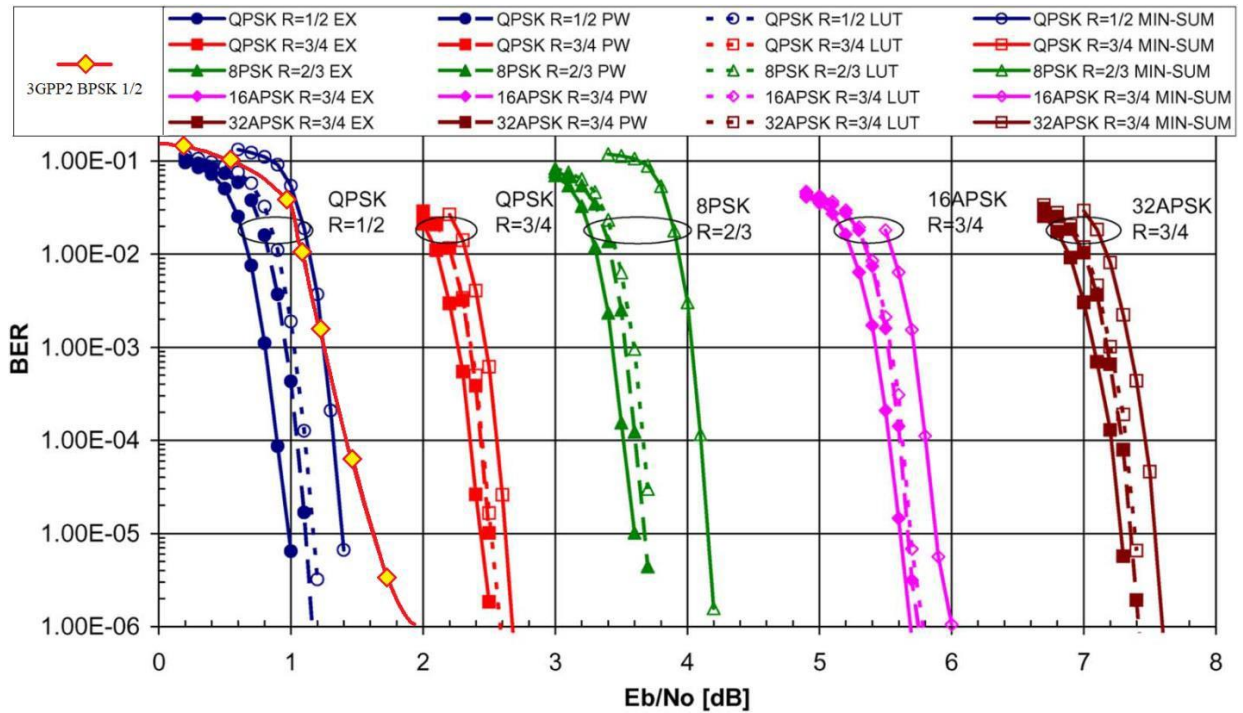


Рисунок 2.7 – Графіки завадостійкості для різних сигнально-кодових структур

Таблиця 2.6 – Продуктивність алгоритмів декодування *LDPC* для короткого кадру при $BER = 10^{-7}$

Алгоритм	$R = 1/2, QPSK$	$R = 3/4, QPSK$	$P = 2/3, 8PSK$
Exact (EX)	1,05 дБ	2,50 дБ	3,65 дБ
Jacobian	1,05 дБ	2,50 дБ	3,65 дБ
Riecewise (PW) Linear	1,15 дБ	2,55 дБ	3,70 дБ
Normalized Min-SUM(NMS) ($\alpha = 1.25$)	1,15 дБ	2,55 дБ	3,75 дБ
Look-UP-Table(LUT)	1,20 дБ	2,60 дБ	3,80 дБ
Offset Min-Sum (OMS) ($\beta = 0.15$)	1,25 дБ	2,65 дБ	3,90 дБ
Min-Sum (MS)	1,45 дБ	2,70 дБ	4,15 дБ

Як видно з рисунку 2.7, коди LDPC мають значну перевагу, оскільки при високій достовірності крутизна кривої завадостійкості турбокоду зменшується і на $P_{ном} \approx 10^{-7}$ асимптотично утворює «полку», тобто неможливо отримати меншу ймовірність помилки.

Стандарт DVB-S2 використовує каскадне кодування (зовнішній код Боуз-Чоудхурі-Хоквінгом (BCH) і внутрішній код LDPC). Після декодування LDPC генерується невелика відстань коду, що збільшує область насичення ймовірності помилки і використовує зовнішній код для її зменшення.

Каскадний код LDPC+BCH забезпечує більш ефективне використання ресурсу каналу, ніж коди захисту від перешкод стандарту DVB-S. Він дозволяє працювати при співвідношенні E_b/N_0 лише на 0,7 дБ вище межі Шеннона для заданої швидкості, в той час як використання згортки в парі з кодом Ріда-Соломона вимагало перевищення ліміту Шеннона приблизно на 5 дБ.

Новий стандарт допускає більш високу ймовірність помилки (BER) на виході декодера, ніж DVB-S. Кодери DVB-S забезпечують допустимий BER до 10^{-11} , а використання каскадного коду LDPC+BCH збільшує допустимий BER до 10^{-7} [4]. Це відповідає виникненню однієї помилки на годину при передачі потоку зі швидкістю 5 Мбіт/с (стандартна швидкість передачі телевізора, стисненого в MPEG-2). Такий рівень BER прийнятний для більшості застосувань. Стандарт *DVB-S* має надмірний рівень надійності, що обумовлено особливостями коду Ріда-Соломона. У разі передачі пакетної інформації до неї перед подачею на кодери FEC застосовується кодування CRC-8 (Cyclic Redundancy Check) кодуючи, дані чергуються для захисту від завад високої тривалості.

На рис. 2.8 показана залежність ймовірності помилки на виході зовнішнього декодатора BCH від ймовірності помилки внутрішнього блоку декодера LDPC.

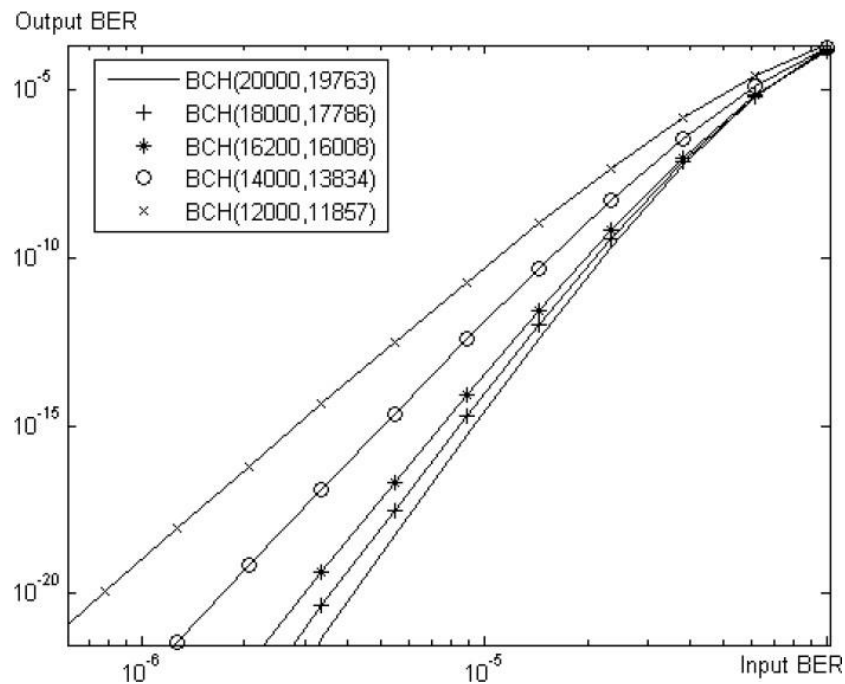


Рисунок 2.8 – Залежність ймовірності помилки на виході зовнішнього декодера BCH від BER внутрішнього декодера LDPC

Каскадне кодування здійснюється шляхом передачі блоків даних. Блокове кодування дозволяє передавати кожен кадр з певною частотою кодування і модуляції без порушення синхронізації на приймачі. Також блокове кодування є найбільш зручним з точки зору реалізації та можливої модернізації алгоритму, тому що немає залежностей від зовнішніх блоків, що в свою чергу полегшує моделювання, налагодження або будь-яку іншу модифікацію блоку.

Завдяки каскадному кодуванню область насичення за ймовірністю помилки значно зміщена в бік низьких ймовірностей, що зумовлює вибір на користь каскадного кодування *BCH+LDPC* у стандарті *DVB-S2*.

2.4 Адаптивний підбір сигнально-кодових побудов в залежності від умов поширення сигналу

Один із шляхів підвищення ефективності роботи систем супутникового зв'язку ММДХ пов'язаний з використанням режиму адаптивного кодування та модуляції (АСМ). Режим АСМ дозволяє виключити запас по енергетиці від 4 до

8 дБ, розрахований на несприятливі умови прийому. Це дозволяє збільшити пропускну здатність репітера в два-три рази.

На рис. 2.9 показана схема роботи ССЗ в режимі АСМ. Система включає в себе шлюз АСМ, модулятор DVB-S2 з підтримкою АСМ, передавальну наземну станцію, супутник і супутникову систему прийому сигналу, підключену до шлюзу АСМ по зворотному каналу [31].

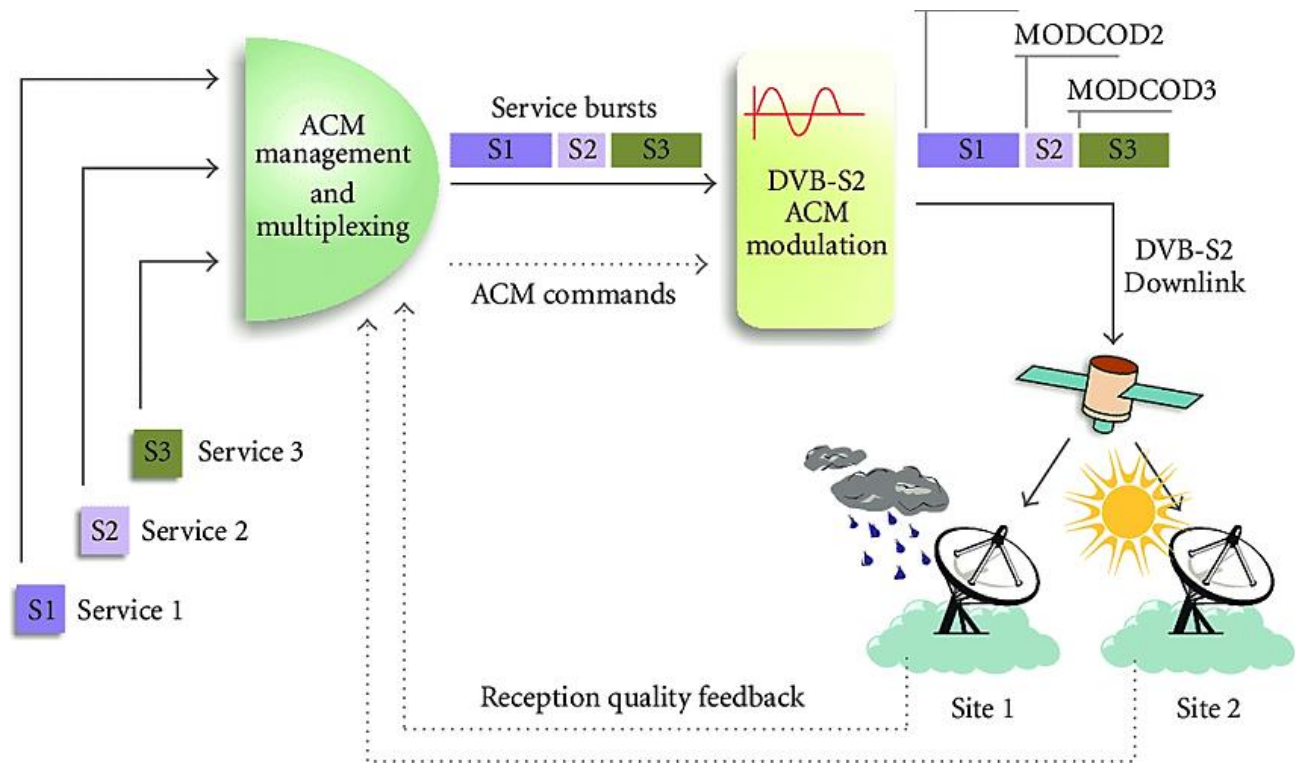


Рисунок 2.9 – Ілюстрація роботи системи супутникового зв'язку в режимі АСМ

Використання даного режиму дає можливість змінювати індивідуально для кожного зі споживачів тип передачі, в тому числі тип модуляції і швидкість завадостійкого кодування, відповідно до інформації про якість прийнятих сигналів на стороні абонента. Центральна станція отримує цю інформацію від абонентів по зворотному каналу, спеціальний алгоритм на стороні центральної станції автоматично приймає рішення про тип використовуваної передачі.

Робота в режимі АСМ вимагає контролю швидкості потоків даних користувача для запобігання перевантаження каналів в поганих погодних умовах. Реалізація такого підходу при великій кількості користувачів (сотні або тисячі) і необхідності індивідуальної адаптації утруднена.

Режим ACM є перспективним для використання в мобільних VSAT системах MMBX для підтримки необхідної якості каналу зв'язку за стандартом *DVB-S2*. При цьому кожен кадр в пакеті *DVB-S2* кодується своїми унікальними параметрами, які змінюються відповідно до умов прийому на кожному супутниковому модемі (рисунок 2.10).

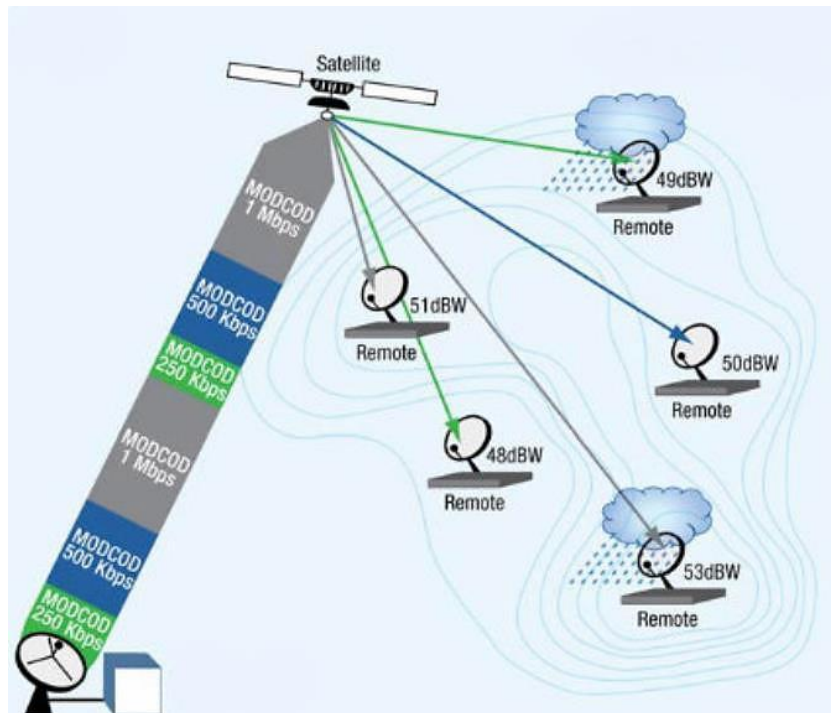


Рисунок 2.10 – Реалізація AFM для різних MODCOD

Супутниковий модем визначає якість параметрів прийому і загасання для конкретної станції з інтервалом в кілька мілісекунд. Інформація про умови прийому передається по зворотному каналу на центральну земну станцію (ЦМС), де проводиться її аналіз. Коли коефіцієнт загасання досягає максимально допустимого значення для необхідної якості зв'язку, ЦЗС змінює параметри модуляції та/або кодування сигналу для відновлення необхідного запасу потужності. *DVB-S2* в поєднанні зі шлюзом енкапсулятором дозволяє з високою достовірністю отримувати дані на модемах ЗС і визначати тип модуляції і FEC, які використовуються в потоці даних.

Параметр MODCOD вказує конкретному терміналу VSAT, який тип модуляції та FEC будуть використовуватися при передачі інформації. У режимі

AFM параметр MODCOD змінюється для кожного терміналу VSAT від кадру до кадру FEC, забезпечуючи спектральну ефективність мережі, близьку до максимально досяжної (до 3 (біт/с)/Гц для модуляції PSK-8).

У таблиці 2.7 наведені комбінації типу модуляції і коефіцієнта кодування, рекомендовані стандартом DVB-S2 як MODCOD для кожного окремого кадру прямого каналу в залежності від умов поширення сигналу при збереженні постійної символної швидкості. Тип MODCOD вказується на початку кадру DVB-S2 у заголовку фізичного шару (PLHEADER). Так як необхідно з максимальною впевненістю прийняти PLHEADER для вказівки демодулятору необхідного режиму MODCOD, то для його передачі використовується модуляція « $\pi/2$ -BPSK», яка має максимальну завадостійкість.

Таблиця 2.7 – Значення полів MODCOD

Значення MODCOD	Модуляція, швидкість FEC	Значення MODCOD	Модуляція, швидкість FEC	Значення MODCOD	Модуляція, швидкість FEC	Значення MODCOD	Модуляція, швидкість FEC
00000	Кл. КФУ	01000	QPSK, 4/5	10000	PSK-8, 8/9	11000	**, 3/4
00001	QPSK, 1/4	01001	QPSK, 5/6	10001	PSK-8, 9/10	11001	**, 4/5
00010	QPSK, 1/3	01010	QPSK, 8/9	10010	*, 2/3	11010	**, 5/6
00011	QPSK, 2/5	01011	QPSK, 9/10	10011	*, 3/4	11011	**, 8/9
00100	QPSK, 1/2	01100	PSK-8, 3/5	10100	*, 4/5	11100	**, 9/10
00101	QPSK, 3/5	01101	PSK-8, 2/3	10101	*, 5/6	11101	Резерв
00110	QPSK, 2/3	01110	PSK-8, 3/4	10110	*, 8/9	11110	Резерв
00111	QPSK, 3/4	01111	PSK-8, 5/6	10111	*, 9/10	11111	Резерв
Примітка – * – APSK -16, ** – APSK -32							

Таким чином, режим ACM дозволяє нейтралізувати негативний вплив негоди на якість зв'язку. Мережа спочатку налаштовується на максимальну

пропускну здатність в заданому регіоні (режим чистого неба). Оскільки дощі, особливо сильні, короткочасні, максимальна пропускна здатність мережі досягається в 80-90% випадків. Використання АСМ приріст трафіку коливається від 40 до 150%, в залежності від розміру мережі, географічного розсіювання і дощових регіонів країни[31].

Використання режиму АСМ можливо тільки при наявності зворотного каналу для контролю ефективності застосовуваних параметрів передачі. Це означає, що режим АФМ не застосовується ні для супутникового телебачення, ні для одностороннього інтернету .

2.5 Адаптація та рандомізація транспортного потоку

Блок адаптації транспортного потоку як для стандартів DVB-S2, так і для DVB-SH виконаний за аналогічною схемою. Є поля заголовка і поле контрольної суми. Втрата ефективності від введення службових полів в DVB-SH становить 0,9% для 12282-бітного пакета, а в DVB-S2 2,5% для 16200-бітного пакета при швидкості кодування 1/4. Скремблер, який використовується для рандомізації транспортного потоку, однаковий: $1+X^{14}+X^{15}$.

Завадостійкість системи зв'язку при використанні кодеків стандартів DVB-S2 (LDPC+BCH) і DVB-SH (3GPP2) порівнянна (втрати перших не більше 0,75 дБ).

У стандарті DVB-SH розмір інформаційного блоку кодового слова визначається розміром перемешувача, що використовується в турбокоді відповідно до рекомендації 3GPP2 і дорівнює 12282 бітам. У стандарті DVB-S2 довжина інформаційної частини варіюється в залежності від використовуваної швидкості коду.

Використання турбокоду відповідно до рекомендацій 3GPP2 накладає деякі обмеження на систему зв'язку. У зв'язку з наявністю похибки порогу насичення в $P_b=10^{-7}$ і повільно зменшувана кількість помилок при збільшенні енергії в лінії, даний кодек не підходить для використання в магістральних каналах зв'язку. Кодек зі стандарту DVB-S2 позбавлений цього недоліку, так як

зазначений поріг значно зміщений вниз. Ще одна перевага кодів LDPC, якщо порівнювати з турбо-кодами, то це їх реалізація в апаратній частині. Швидша робота, а отже, і більша пропускна здатність можуть бути досягнуті за рахунок використання архітектури паралельного декодера.

У стандарті DVB-SH використовуються типи модуляції зі стандарту DVB-S2 в режимі TDM.

Можливість зміни параметрів сигналу в процесі роботи системи визначає особливості структури кадру сигналу DVB-S2. Структурна схема тракту передачі модему DVB-S2 показана на рис. 2.11.

Робота адаптаційного блоку залежить від обраного режиму роботи системи: постійного кодування і модуляції (CCM), змінні (VCM) або адаптивні (ACM). Дані надходять через пристрій введення з одного або декількох потоків даних. Якщо використовується режим ACM, то дані відправляються на пристрій синхронізації та видалення нульових пакетів (NP). Пристрій синхронізації гарантує постійну швидкість потоку даних і, при необхідності, затримку. Для виявлення помилок в переданих даних на приймальному кінці в блок адаптації вводиться енкодер CRC-8. Якщо передається кілька потоків, дані об'єднуються. Згодом дані розбиваються на блоки з кодом *FEC*: 64800 біт для звичайного блоку, 16200 для укороченого блоку.

Блок адаптації потоку призначений для заповнення регіону даних і зашифровки заголовка і даних. Заповнення виконується, коли призначені для передачі дані користувача не повністю заповнюють область даних.

Блок FEC генерує кадри FEC і реалізує кодування LDPC як зовнішній BCH-код, LDPC як внутрішній код (кодові швидкості: $1/4$, $1/3$, $2/5$, $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$, $8/9$, $9/10$), а також перемежуються біти для PSK-8, APSK-16 і APSK-32. Використання різної довжини блоків коду FEC (64800 біт і 16200 біт) обумовлено двома протилежними факторами. З одного боку, спостерігається поліпшення співвідношення сигнал/шум для довгих блоків, з іншого - збільшення часу очікування модему на приймальній стороні. У зв'язку з цим вибір розміру блоку FEC визначається типом програми, що використовується в

системі

Блок дискретизації сигналу (БДС) призначений для отримання комплексних кадрів FEK для QPSK, PSK-8, APSK-16 і APSK-32.

Блок формування кадрів (FC) забезпечує формування кадрів шляхом додавання заголовків FI до кадрів FEC, а також вставки порожніх кадрів фізичного шару (порожні кадри передаються, коли немає корисного навантаження для передачі по каналу) і пілотних символів. Заголовок FI містить інформацію про параметри кадру та режим передачі на фізичному рівні.

Модулятор формує смугу пропускання сигналу шляхом фільтрації вхідного сигналу, реалізує квадратурну модуляцію, генерує РЧ сигнал.

На основі представленої структури тракту передачі сигналу DVB-S2 (рисунок 2.11) розглянуто особливість формування кадрової структури сигналу.

Таким чином, використання каскадної конструкції кодів BCH і LDPC забезпечує високу корекційну здатність при низьких співвідношеннях сигнал/шум. Для досягнення цих характеристик використовуються 16200-бітні і 64800-бітні кодові слова, а також ітеративна процедура декодування з великою кількістю ітерацій.

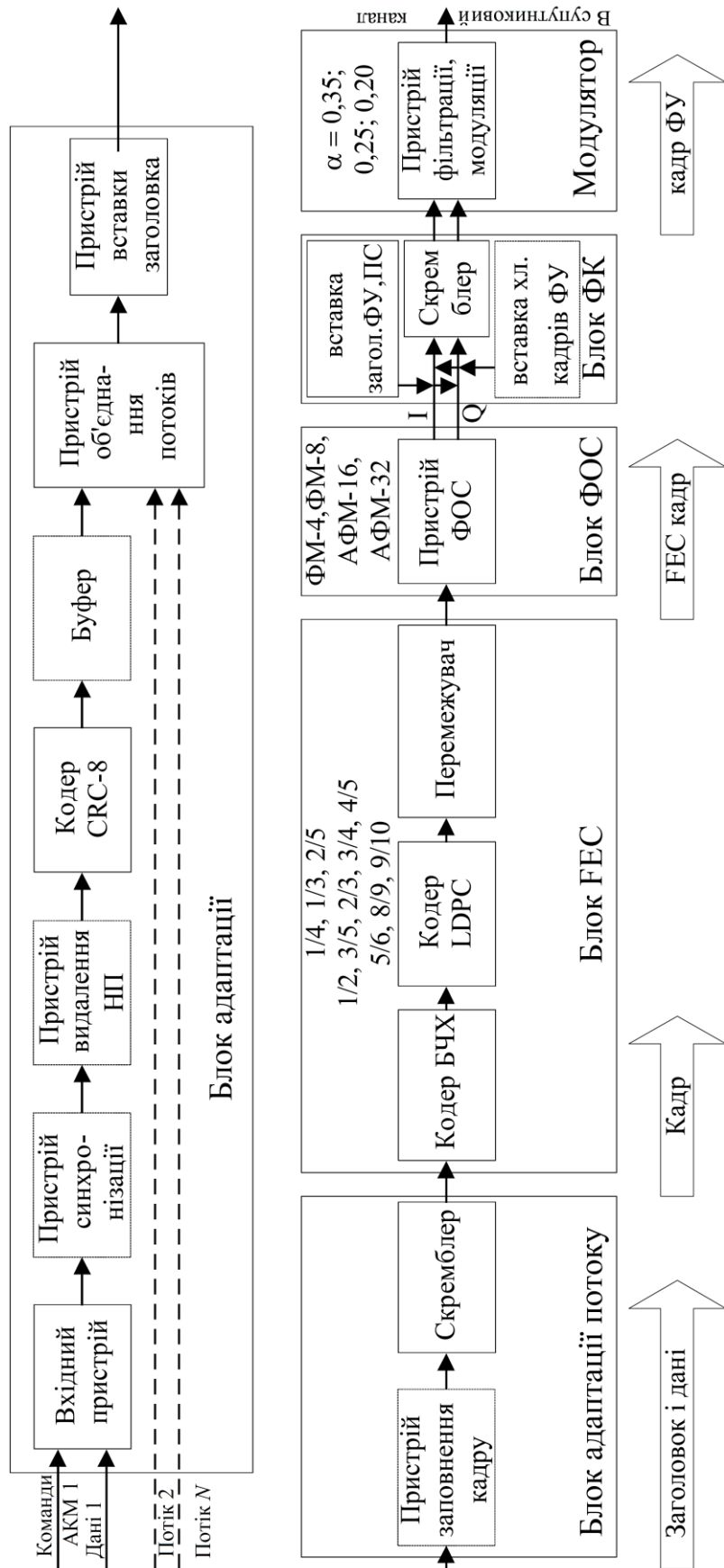


Рисунок 2.11 – Структурна схема тракту передачі модему DVB-S2

2.6 Висновки

1. Загасання сигналу в супутниковому радіоканалі *Ka/Q*-діапазону адекватно описує модель квазістаціонарного каналу прямої видимості. Загасання сигналу містить квазістатичну складову 213 і 220 дБ для діапазонів *Ka* і *Q* відповідно, а також динамічну складову, яка змінюється в залежності від інтенсивності дощу в діапазоні від 0 до 5,6 і 15,5 дБ для *Ka* і *Q* діапазонів, відповідно. Сумарні втрати енергії з урахуванням всіх складових загасання для високоеліптичної орбіти супутників, для максимальної інтенсивності дощу становлять 218 і 235 дБ відповідно для діапазонів *Ka* і *Q*.

2. Для зниження негативного впливу погодних умов на супутникові радіоканали діапазону ММДХ доцільно використовувати адаптивні механізми, які динамічно змінюють швидкість передачі даних, тип кодування, модуляцію і потужність сигналу в залежності від погодних умов. Такі рішення гарантують передачу пріоритетного трафіку практично за будь-яких погодних умов.

3. У супутникових мережах зв'язку ММВХ доцільно використовувати фазову модуляцію типів *BPSK*, *QPSK* і *8PSK* для зв'язків з малою енергією і амплітудно-фазовою модуляцією *16APSK*, *32APSK* і з більш високою позиційністю з метою економії частотного ресурсу - для ліній з більш високою енергією.

4. Порівняння режимів модуляції *16QAM* і *16APSK* по стійкості до нелінійності тракту вказує на перевагу *16APSK*: досяжна середня потужність підсилювача потужності на 1...2 дБ більше, що дає можливість отримати мінімальну ймовірність помилки на 1-2 порядки менше, ніж для *16QAM*.

5. Для економії частотного ресурсу слід використовувати мінімально можливе значення коефіцієнта «згладжування» формуючого фільтра (до 0,05). При цьому слід враховувати, що цей захід вимагає більшого запасу в лінійності тракту, що знижує енергетику радіолінії.

6. Перспективним є використання турбо і LDPC кодів в мережах супутникового зв'язку, так як вони знижують вартість супутникового терміналу за рахунок використання антен меншого розміру і передавачів меншої

потужності.

7. В якості одного з найбільш перспективних для використання в мережах супутникового зв'язку ММДХ, можна рекомендувати каскадне кодування BCH+LDPC з широким діапазоном кодових швидкостей, що використовуються в стандарті DVB-S2, як найбільш гнучке і з хорошими характеристиками. Застосування сигнально-кодових конструкцій на основі типів модуляції QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK та завадостійкого кодування LDPC+BCH корисний для розробки модемів для станцій супутникового зв'язку.

Важливою перевагою стандарту DVB-S2 є можливість реалізації режиму ACM, що дозволяє швидко змінювати тип модуляції і швидкість роботи завадостійкого коду для адаптації каналу зв'язку до мінливих умов поширення сигналу.

3. СИНТЕЗ МОДЕМІВ ММВХ НА СУЧАСНИХ АПАРАТНИХ ПЛАТФОРМАХ

В даний час більшість виробників використовують в модемному обладнанні супутникового зв'язку фазову, квадратурну амплітуду і амплітудно-фазову модуляцію з позиціонуванням $M \leq 32$. Практично всі провідні виробники VSAT модемного обладнання перейшли на стандарт DVB-S2. При цьому ряд виробників заявляють про готовність використовувати нову версію стандарту DVB-S2 – DVB-S2X, який регламентує використання модуляцій з позиційною ємністю до 256.

Пріоритетним напрямком підвищення ефективності роботи модемного обладнання є зниження вартості супутникового терміналу. Для досягнення поставленої мети необхідно при побудові супутникових модемів зменшити геометричні розміри приймальних антен, зменшити потужність передавальних пристроїв і використовувати прості готові рішення, реалізовані у вигляді загальних спеціалізованих мікросхем, а також апаратних платформ на основі ПЛІС. При цьому вимоги до безпомилкової передачі інформації знижуватися не повинні.

3.1 Структурні схеми трактів передачі та прийому супутникового модему

Існує два основних підходи до реалізації модемного тракту передачі: пряме перетворення з нульовою проміжною частотою (ПЧ) і пряме перетворення з комплексною ПЧ [4,8].

Архітектура прямого перетворення з нульовою проміжною частотою показана на рисунку 3.1. Для спрощення вимог до фільтрації сигналу цифровий комплексний сигнал при нульовій ПЧ «передискретизується» (інтерполюється) і подається в ЦАП. Комплексний аналоговий сигнал при нульовій ПЧ з виходів ЦАП фільтрується і подається в комплексний модулятор. Перевага системи

полягає в простоті безпосереднього перенесення спектру сигналу з нульовою ПЧ на точно задану частоту. Недолік полягає в наводці сигналу гетеродину і дзеркальної складової в смугу корисного сигналу.

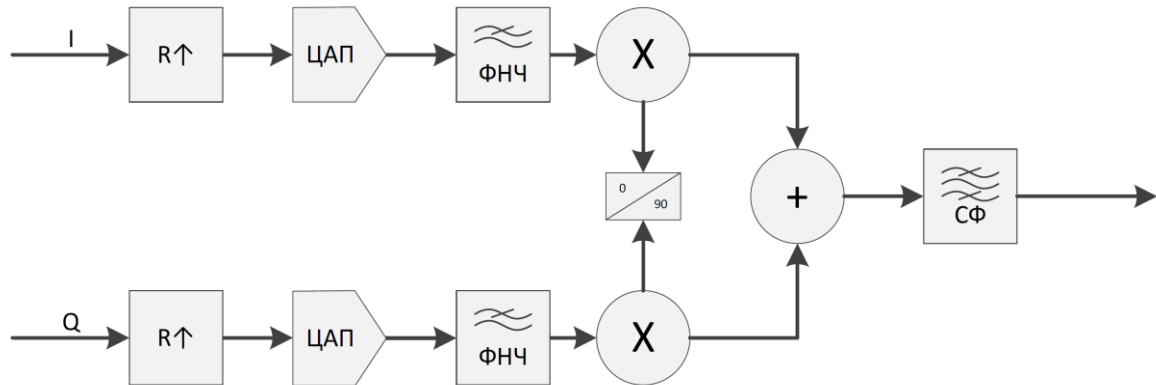


Рисунок 3.1 – Архітектура прямого перетворення з нульовою ПЧ

Архітектура прямого перетворення з комплексною ПЧ відрізняється від нульової ПЧ наявністю додаткового цифрового модулятора, який в цифровому вигляді переносить вихідний сигнал на ПЧ (рис. 3.2). Застосування ПЧ вимагає використання смугового фільтра перед остаточною модуляцією сигналу.

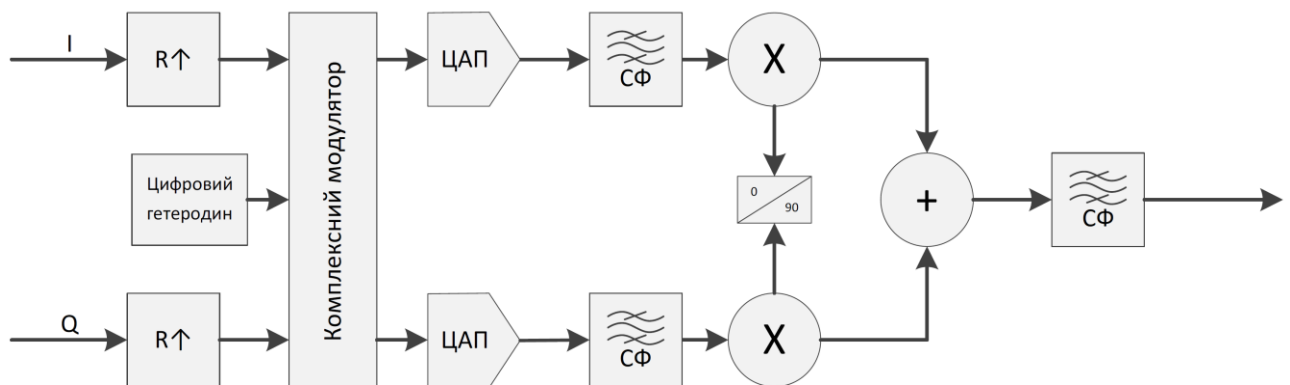


Рисунок 3.2 – Архітектура прямого перетворення з комплексною ПЧ

З урахуванням цього доцільно використовувати архітектуру тракту передачі з прямим перетворенням для реалізації передавача в діапазонах Ka/Q. Після модулятора сигналу встановлюється конвертер для переносу спектра

сигналу з L-діапазону в діапазони Ka/Q.

На рис. 3.3 показана структурна схема модемного тракту передачі, що містить:

- двоканальний ЦАП, що формує сигнал ПЧ;
- ФНЧ, що придушує гармоніки основного сигналу;
- гетеродин, який формує частоту перенесення L-діапазону;
- модулятор, що здійснює перенесення сигналу з нульової ПЧ в L-діапазон;
- смуговий фільтр для обмеження спектра переданого сигналу в L-діапазон.

Формування комплексного сигналу може здійснюватися при нульовому ПЧ, що спрощує конструкцію ФНЧ.

16-розрядний двоканальний ЦАП забезпечує формування комплексних сигналів з динамічним діапазоном 96 дБ. Частоту ЦАП слід вибрати як мінімум удвічі ширше потрібного спектра сигналу на максимальній швидкості. Можливе використання «наддискретизації» для спрощення вимог до вихідного ФНЧ.

Слід зазначити, що для роботи передавача в Ka/Q-діапазонах необхідний конвертер.

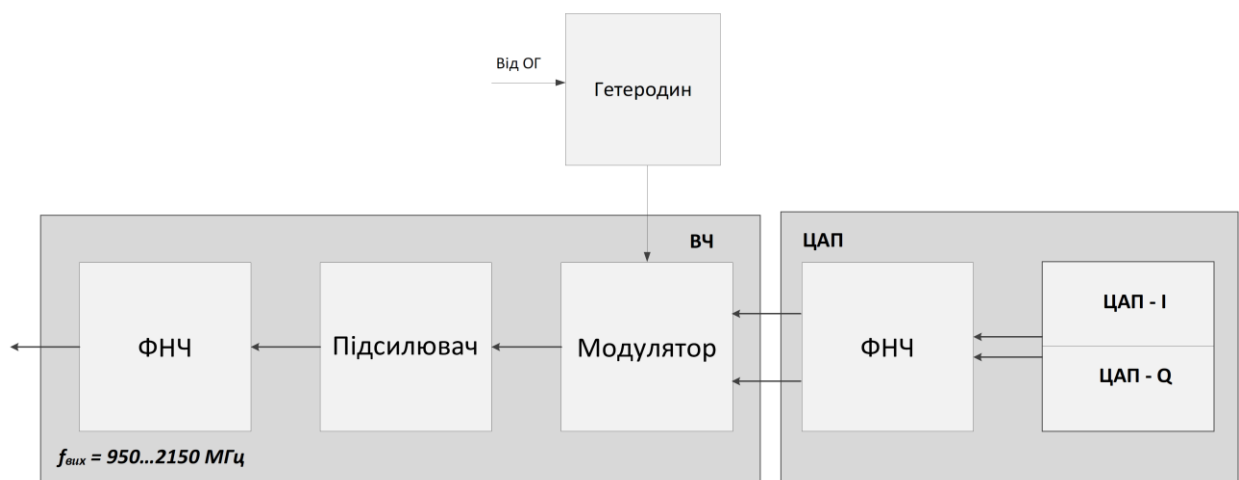


Рисунок 3.3 – Структурна схема модему тракту передачі

3.2 Архітектура приймального тракту модему

Приймальний тракт підсилює, фільтрує, переносить спектр сигналу і перетворює сигнал в цифрову форму.

Коефіцієнт підсилення для компенсації втрат при передачі реалізується за допомогою малошумних підсилювачів (LNA) на перших каскадах. Також може застосовуватися автоматичне регулювання коефіцієнта підсилення.

Фільтрація потрібна для виділення потрібного сигналу і придушення заважаючих сигналів. Достатня селективність може бути досягнута різними фіксованими фільтрами (SAW, керамічними, кварцовими, механічними) в високочастотних і проміжних частотних каскадах.

Для перенесення спектра сигналу використовується змішувач. Для формування сигналу гетеродина використовуються синтезатори частоти, керовані напругою, струмом або програмним забезпеченням.

Перетворення сигналу в цифрову форму здійснюється за допомогою АЦП. Існують різні технології АЦП, ключовими характеристиками яких є архітектура, розрядність, співвідношення сигнал/шум і джитер.

Існує дві широко використовувані архітектури приймального тракту: супергетеродинна і прямого перетворення. Супергетеродинні приймачі широко використовувалися аж до 2000-х років.

Архітектура супергетеродина показана на рисунку 3.4.

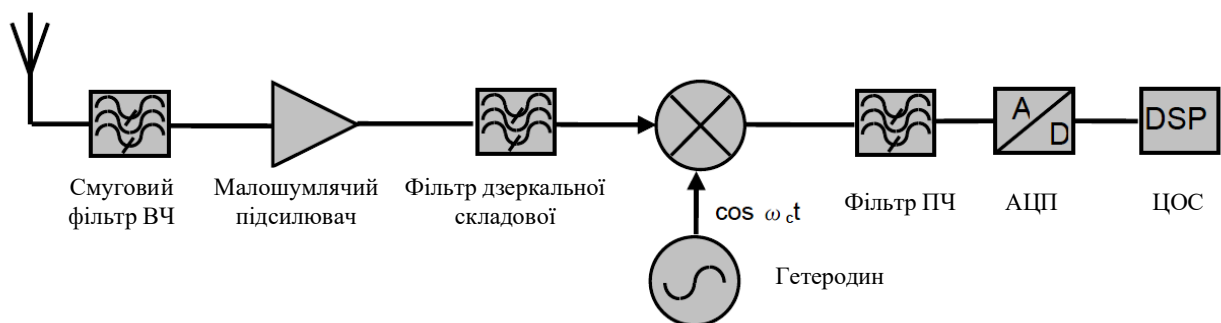


Рисунок 3.4 – Архітектура супергетеродинного приймача

Селективність супергетеродина забезпечується каскадами ПЧ, що працюють на фіксованій центральній частоті з використанням спеціальних технологій фільтрації:

- фільтр повинен мати достатнє загасання в смузі дзеркальної бічної складової при відстойці по частоті;
- кінцевий каскад ПЧ повинен володіти достатньою селективністю для придушення сусідніх каналів;
- в разі подвійного (або потрійного) супергетеродина перший (і другий) каскад ПЧ повинен мати достатнє загасання на частоті наступного каскаду;
- одним із способів зниження вимог до фільтрів є виправлення дисбалансу комплексних компонент I/Q (слід використовувати в комбінації).

Недоліки супергетеродинної архітектури:

- складність інтеграції компонентів (фільтрів, гетеродинів);
- високе енергоспоживання обумовлено паразитними характеристиками дискретних компонентів і необхідністю в низькоомних лініях узгодження між модулями.
- складна архітектура;
- можливість появи паразитарних сигналів.

У сучасних приймачах широко використовується архітектура прямого перетворення, яка є більш перспективною для повної інтеграції в інтегральну мікросхему. Приймач прямого перетворення позбавлений основного недоліку супергетеродина, який пов'язаний з необхідністю придушення дзеркальної бічної складової. Цей недолік усувається перетворенням сигналу безпосередньо на нульову ПЧ за допомогою двох змішувачів в комплексному режимі.

Архітектура прямого перетворення показана на рисунку 3.5.

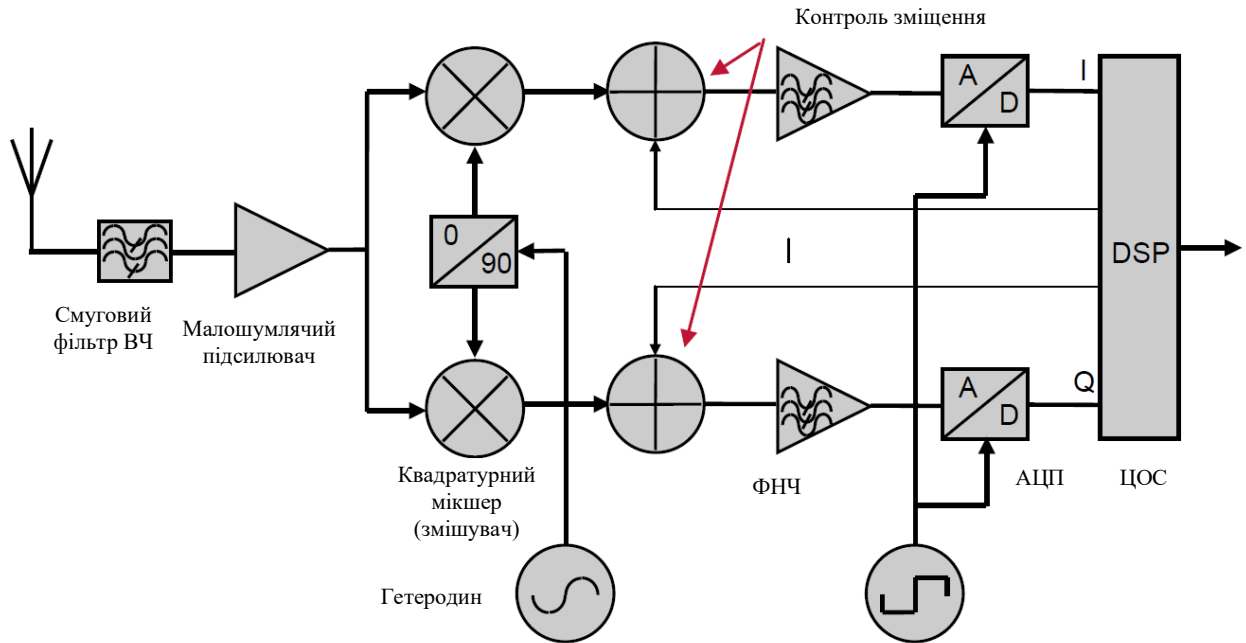


Рисунок 3.5 – Архітектура прямого перетворення

Аналогові ФНЧ після змішувача забезпечують вибірність роботи приймача, а також може виступати в якості згладжуючого фільтра для АЦП. При цьому пропускна здатність фільтра повинна становити половину пропускної здатності каналу, забезпечуючи також придушення бічних і сусідніх каналів.

Селективність приймача забезпечується в основному цифровими фільтрами, наступними за АЦП. Цифрові фільтри, на відміну від аналогових, не мають фізичних паразитних характеристик виробничого процесу, таких як шум і перехресні завади. Завдяки цьому цифрові фільтри мають повторювані і точно визначені характеристики. Крім того, цифрові фільтри можуть бути виготовлені за недорогою CMOS-технологією за рахунок використання цифрових сигнальних процесорів або спеціалізованої схемотехніки. При такому підході, щоб зберегти характеристики основного слабого сигналу, АЦП повинен мати достатню розрядність, щоб оцифрувати будь-який потужний бічний або сусідній канал без перевантаження.

Хоча архітектура з нульовою ПЧ вільна від проблеми придушення дзеркальної складової, вона також вносить свої недоліки, в основному пов'язані з необхідністю високого підсилення низькочастотних сигналів на нульовій ПЧ:

- нелінійність другого порядку приймача, що викликає завади на нульовій частоті;
- зміщення гетеродина, що викликає різні рівні постійного зміщення;
- підсилення постійної складової;
- поява «рожевого» шуму ($1/f$), який знижує чутливість.

Подолання цих недоліків прямого перетворення з нульовою ПЧ вимагає від приймача точного калібрування постійної складової і хорошої характеристики нелінійності другого порядку.

Архітектура прямого перетворення з низькою ПЧ позбавлена цих недоліків, зберігаючи при цьому високий ступінь інтеграції. Багато стандартів радіопередачі менш вимогливі до вибірковості завад бічного каналу, ніж до сусідніх каналів. Приймачі з низькою ПЧ використовують це, вибираючи ПЧ, приймання з якою переміщує дзеркальний канал в бічний канал.

Використання низької ПЧ дозволяє інтегрувати фільтр ПЧ або реалізувати його в цифровому вигляді. Принцип передачі з низькою ПЧ, встановленою на межі спектра корисного сигналу, ілюстрований на рис 3.6.

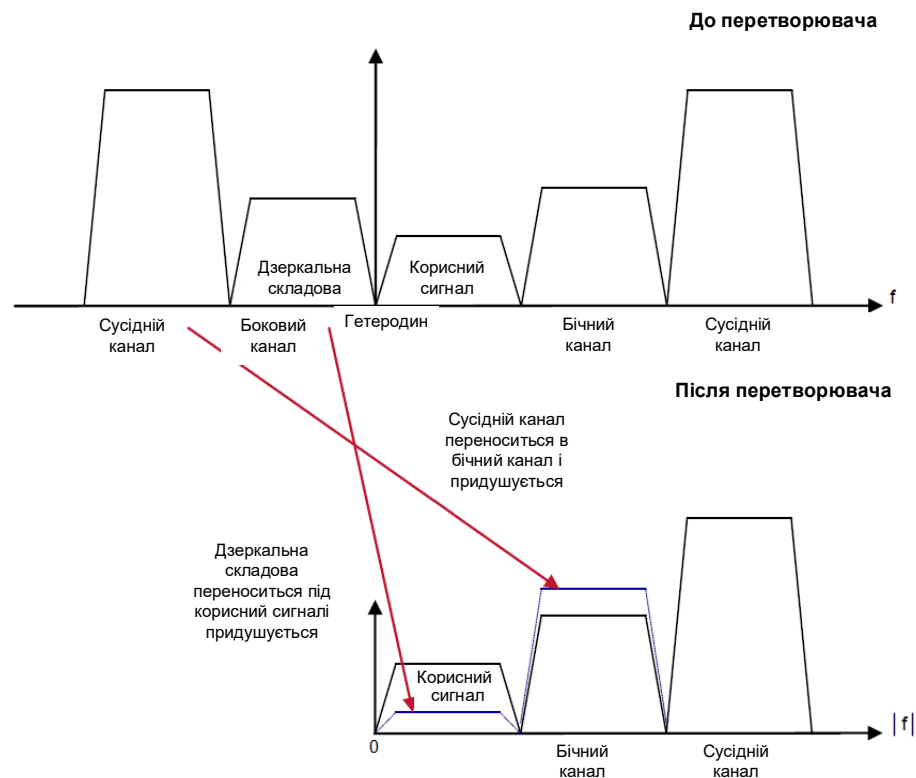


Рисунок 3.6 – Принцип переведення з низького ПЧ

З урахуванням цього пропонується архітектура тракту прийому з прямим перетворенням для реалізації приймального тракту модему в діапазоні Ka/Q. Перед приймачем встановлений конвертор для перенесення спектра сигналу з діапазонів Ka/Q в L-діапазон.

Приймання сигналу можна здійснювати як з нульовою так і з низькою ПЧ. Для використання нульової ПЧ потрібен комплексний демодулятор, який генерує комплексні сигнали I/Q на виході ПЧ. Прийом низьких швидкостей при нульовій ПЧ утруднений через спотворення корисного сигналу через входження значної частини його спектра в смугу коректора нуля. Тому прийом низьких швидкостей повинен здійснюватися при низьких ПЧ при цьому втрачається здатність ефективно придушувати завади за допомогою аналогового ФНЧ і вимагає додаткової цифрової обробки сигналу в ПЛІС - цифровому переведенні на нульову ПЧ з подальшою фільтрацією.

12-розрядний двоканальний АЦП забезпечить оцифровку комплексних сигналів з динамічним діапазоном 72 дБ. Частота АЦП повинна бути як мінімум удвічі більше ширини потрібного спектра сигналу при максимальній швидкості. Можливе використання «наддискретизації» для спрощення вимог до вхідного ФНЧ.

Слід зазначити, що для роботи ресивера в Ka/Q-діапазонах необхідний перетворювач.

Структурна схема приймального тракту модему показана на рисунку 3.7.

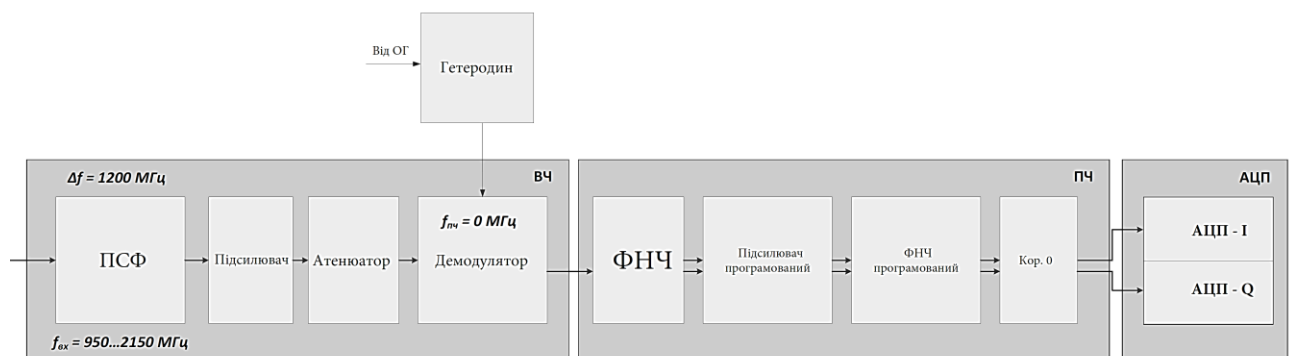


Рисунок 3.7 – Структурна схема приймального тракту модему

Приймальний тракт містить:

- смуговий фільтр для обмеження спектра прийнятого сигналу в L-діапазоні;
- підсилювач фіксованої потужності;
- програмований атенюатор для реалізації механізмів компенсації АЧХ тракту, а також автоматичного регулювання підсилення;
- гетеродин, який формує частоту перенесення L-діапазону;
- демодулятор, який переносить прийнятий сигнал на ПЧ
- ФНЧ необхідний для попередньої фільтрації;
- програмований підсилювач для автоматичного регулювання підсилення;
- програмований ФНЧ демодульованого сигналу, що регулюється на ширину спектра потрібної швидкості;
- двоканальний АЦП.

3.3 Структурна схема супутникового модему

Опис побудови модему супутникового зв'язку ММДХ з використанням технології Software Defined Radio в контексті обраної архітектури побудови радіотракту наведено нижче. Технологія SDR дозволяє змінювати функціональність пристрою без зміни його конструкції та схеми побудови.

На рис. 3.8 показана структурна схема модему станції супутникового зв'язку ММДХ, розроблена відповідно до прийнятих раніше міркувань, стрілками вказані взаємодії між компонентами.

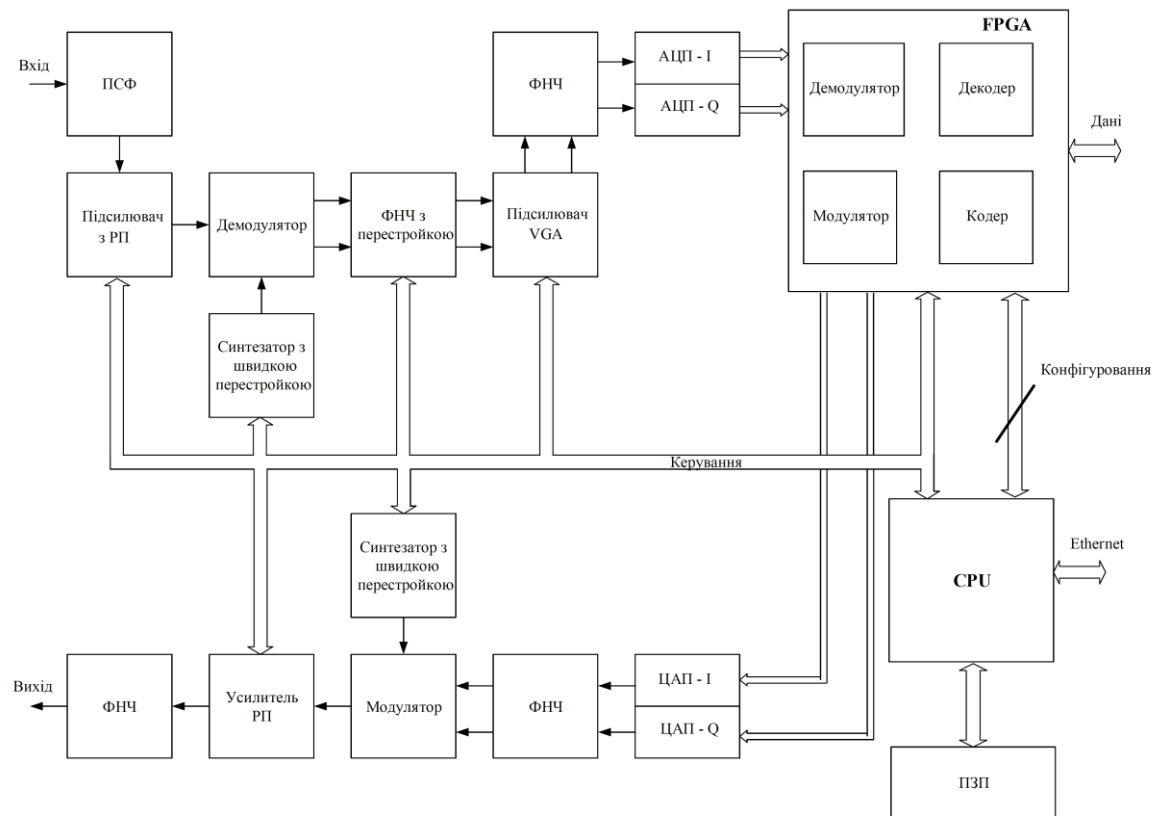


Рисунок 3.8 – Структурна схема модему станцій супутникового зв'язку ММДХ

Процесор використовується для керування, всіма компонентами модему і настройки ПЛІС. Залежно від конфігурації ПЛІС, модем може підтримувати різні типи модуляції і типи завадостійких кодів.

Перетворення в тракті передачі в загальному випадку виглядають наступним чином: дані користувача надходять в процесор через інтерфейс Ethernet, на базі якого реалізується функціонал роутера зі специфічним функціоналом, що дозволяє більш ефективно передавати трафік користувача через супутник ретранслятор. Від процесора попередньо оброблені дані надходять в ПЛІС, де об'єднуються з іншими заздалегідь підготовленими даними, що містять різну службову інформацію. Після цього агрегований потік надходить в модуль формування завадостійкого групового сигналу. Далі ГС піддається завадостійкому кодуванню з подальшою модуляцією в основній смузі. У такому вигляді модульований сигнал надходить в спектроформуючий фільтр, а з його виходу надходить на вхід ЦАП, де інтерполюється і згодом

перетворюється в аналогову форму. З виходу ЦАП синфазна і квадратурна складові, проходячи через фільтр низьких частот, надходять на вхід квадратурного модулятора, а на його другий вхід надходить сигнал від гетеродина. Перенесений на проміжну частоту сигнал підсилюється, відфільтровується і може використовуватися як вхідний для конвертора.

Перетворення в тракті прийому аналогічні перетворенням в тракті передачі, тільки в зворотньому порядку. Попередньо відфільтрований аналоговий сигнал підсилюється і надходить на вхід демодулятора. З виходу демодулятора сигнал фільтрується фільтрами низьких частот з можливістю підсилення. Після цього оцифровується АЦП. У ПЛІС сигнал демодулюється, декодується і відправляється на процесор, який в свою чергу інкапсулює ці дані в пакети і передає їх користувачеві.

Параметри модулятора, демодулятора, кодеків модему можуть бути змінені за допомогою зміни програмного забезпечення. Прошивки ПЛІС і процесора зберігається в ПЗП, яку можна змінювати в процесі роботи. Зовнішнє по відношенню до модему програмне забезпечення, що підключається до процесора по FTP, змінює функціональність модему шляхом простої заміни файлів прошивки.

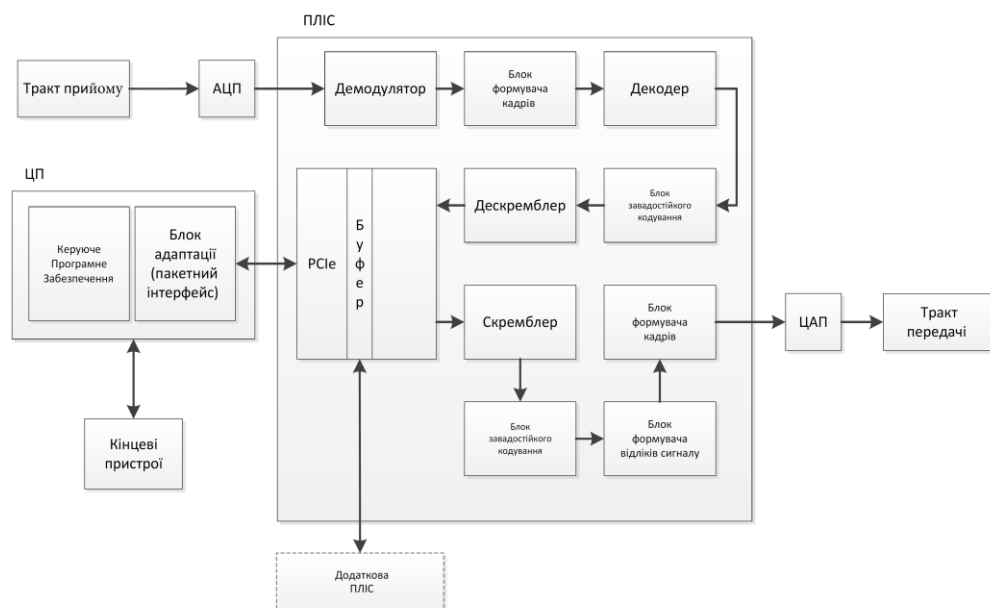


Рисунок 3.9 – Структурна схема апаратної платформи супутникового модему Ka/Q-діапазону

На рисунку 3.9 представлена структурна схема супутникового модему Ka/Q-діапазону, виконаного з використанням технологій SDR [4]. Тип СКК, будь то APSK, QPSK, PSK, $\pi/2$ BPSK, підсилювачі визначаються алгоритмами в ПЛІС і процесорі. АЦП і ЦАП широкосмугові і працюють на високих тактових частотах. Сигнал, що формується на проміжній частоті в смузі частот L, фільтрується і підсилюється.

Високочастотний сигнал формується в модуляторі тракту передачі за рахунок перетворення частоти сигналу ПЧ «вгору». У приймальній частині модему широкосмугові АЦП оцифровують множину вузькосмугових сигналів, які надходять на приймальний тракт. Відповідно до вбудованого програмного забезпечення, ПЛІС витягує, перетворює частоту «вниз» і демодулює сигнали кожного каналу.

3.4 Висновки

1. Для реалізації приймального і передавального трактів в Ka/Q діапазонах найбільш прийнятною є архітектура з прямим перетворенням. На вході приймального тракту встановлений конвертор, що переносить спектр сигналу з діапазонів Ka/Q в L-діапазон, а в передавачі після модулятора сигналу встановлений конвертор, який переносить спектр сигналу з L-діапазону в Ka/Q діапазони.

2. Дуже перспективною є реалізація супутникового модемного обладнання ММДХ з використанням стандарту DVB-S2 та технології SDR. Такий підхід забезпечує можливість оперативного підбору СКК і швидкості передачі інформації в залежності від умов поширення радіохвиль.

3. Використання сучасних ПЛІС високої швидкодії і великої ємності в супутникових модемах ММДХ дозволяє задовольнити вимоги, що пред'являються до станції супутникового зв'язку як за електричними характеристиками прийому і передачі, так і за масовими і габаритними характеристиками.

4. При розробці модемів для супутникового зв'язку ММДХ доцільно

використовувати налагоджувальні платформи з програмованими логічними схемами. Зберігаючи всі переваги ПЛІС, а також завдяки засобам розробки на основі спеціальних програмних пакетів, ПЛІС забезпечують весь виробничий цикл від розробки схем до виробництва модему з можливістю їх швидкої і недорогої модернізації.

4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОДЕМУ ММДХ

4.1 Моделювання супутникового модему діапазону ММДХ

У розділі розглядається енергетична та спектральна ефективність сигнально-кодових структур, що використовуються в модемі супутникового радіоканалу ММДХ, з використанням моделі, розробленої з використанням програмного забезпечення математичного моделювання MatLab/Simulink (рис. 4.1).

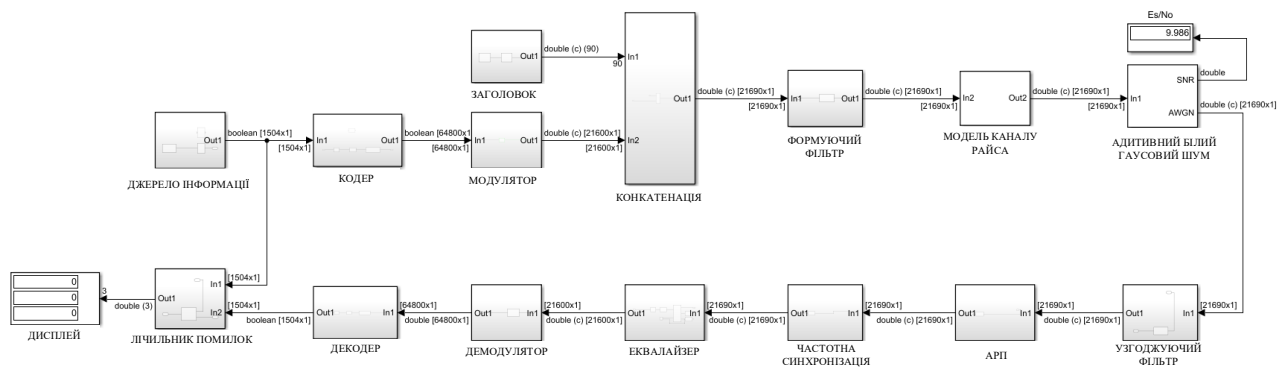


Рисунок 4.1 – Структурна схема моделі модему

Моделі супутникового модему включає в себе наступні блоки:

Блок «Джерело інформації» складається з блоку «Двійковий генератор Бернуллі», який формує дані, що представляють бітовий потік, що надходить на вхід кодера.

Блок "Кодер" (рис. 4.2) складається з блоків "BBFRAME Buffering", які необхідні для формування кадру з інформаційних бітів і подачі його на вхід блоків кодування BCH і LDPC, які кодують відповідно до методу, описаного в стандарті DVB-S2.

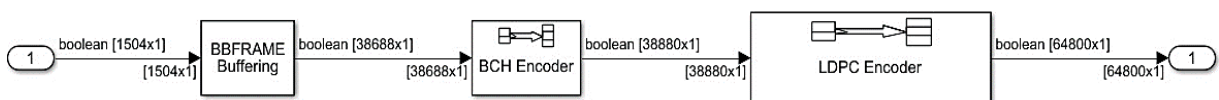


Рисунок 4.2 – Структурна схема блоку ENCODER

Блок "Модулятор" складається з блоків "M-PSK modulator" і "DVBS-APSK modulator", необхідних для установки необхідного типу модуляції: квадратурної фазової модуляції (*QPSK*), 8-позиційної фазової модуляції (8PSK), 16 або 32-позиційної амплітудно-фазової модуляції (16APSK, 32APSK).

Блок "Заголовок" складається з блоку формування преамбули, необхідного для синхронізації і знаходження початку кадру на приймальній стороні, блоку генерації даних, необхідного для адаптивної структури коду сигналу і блоку модулятора $\pi/2$ -BPSK.

Блок «Конкатенація» використовується для передачі заголовка та інформації по одному каналу.

Блок формувального фільтра – включає в себе фільтр Raise Cosine Transmit Filter, який формує спектр з характеристикою «корінь припіднятого косинуса» з коефіцієнтом згладжування $\beta = 0,35$.

Блок «Модель каналу Райса» складається з блоку «SISO Fading Channel», який імітує динамічну зміну сигналу при проходженні через опади.

Блок Additive White Gaussian Noise складається з блоку AWGN, який використовується для визначення необхідного співвідношення потужності сигналу до потужності шуму в моделі.

Блок "Matched Filter" складається з блоку "Raised Cosine Re-ceive Filter", який є оптимальним фільтром "припіднятий косинус" з коефіцієнтом згладжування $\beta = 0,35$.

Блок «Автоматичне регулювання підсилення» складається з блоку «AGC» і використовується для підтримки постійного рівня сигналу.

Блок «Синхронізація частоти» складається з блоку «Carrier Synchro-nizer», який використовується для компенсації доплерівського зсуву частоти.

Блок еквалайзера – складається з блоків LMS Linear Equalizer, Learning та Control, які забезпечують вирівнювання частотних характеристик, синхронізацію символів та пошук початку кадру (рис. 4.3).

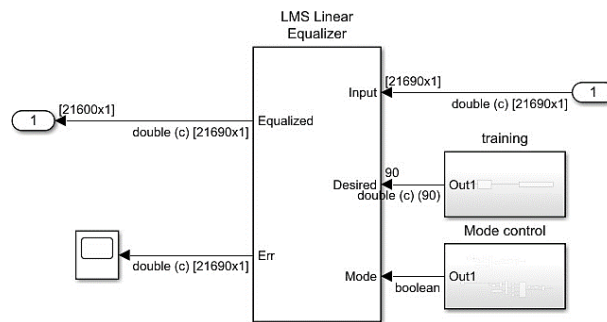


Рисунок 4.3 – Структурна схема блоку еквалайзера

Блок «Демодулятор» – складається з блоків «M-PSK demodulator» та «DVBS-APSK demodulator», необхідних для демодуляції сигналу (QPSK, 8PSK, 16APSK або 32APSK).

Блок "Декодер" складається з блоків декодерів "LDPC", "BCH" і "BBFRAME Unbuffering", які використовуються для декодування і приведення інформації до початкового стану (рис. 4.4).

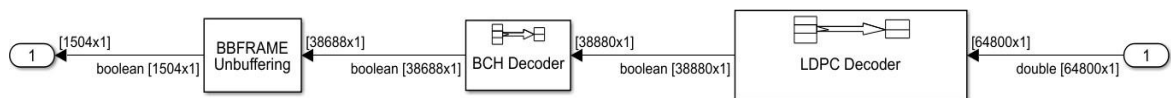


Рисунок 4.4 – Структурна схема блоку DECODER

Блок «Лічильник помилок» складається з блоку «Error Rate Calculation», який виявляє помилки своєї системи в цілому і виводить їх на дисплей.

На рисунку 4.5 показані результати моделювання модему з каскадним кодуванням BCH+LDPC для фазової модуляції 8PSK і швидкостей кодування 2/3, 3/4, 3/5, 5/6, 9/10 з довжиною кадру 64800 біт. Наведено графіки залежності ймовірності розрядної помилки BER від відношення енергії символу до спектральної густини шуму E_b/N_0 .

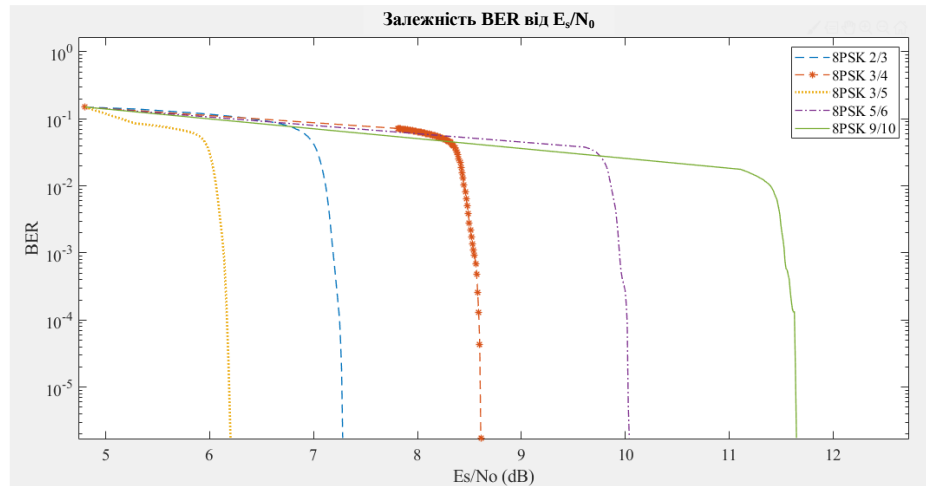


Рисунок 4.5 – Графіки залежності BER від відношення сигнал/шум E_b/N_0

Як видно з рисунку, при ймовірності помилки $BER = 10^{-5}$ порогове значення E_b/N_0 становить 6,2 дБ для найбільш енергоефективних з розглянутих СКК 8PSK 3/5. Це лише на 0,9 дБ вище за межу Шеннона (2.12). У порівнянні з 8PSK 2/3 і 8PSK 3/4 приріст енергії становить близько 1 і 2 дБ відповідно, а максимум становить близько 5 дБ в порівнянні з 8PSK 9/10.

4.2 Висновки

1. Сигнально-кодові структури на основі багатопозиційних типів модуляції PSK і APSK з завадостійким кодуванням LDPC+BCH є дуже перспективними для розробки модемів супутникового радіоканалу міліметрового діапазону.

2. Для зниження залежності якості зв'язку від погодних умов необхідно використовувати адаптивні режими по швидкості передачі даних, типу СКК (видам модуляції і кодування), а також потужності сигналу передачі - такі рішення гарантують передачу пріоритетного трафіку практично в будь-яких погодних умовах.

При швидкостях передачі даних до 58 Мбіт/с норми фазового шуму, визначені регламентом IESS-309, повинні бути доповнені допустимими рівнями SPM при перебудові частоти 10 і 50 МГц: мінус 110, 115, 120 дБ/Гц і 125, 130, 135 дБ/Гц відповідно для сигналів з модуляцією 8PSK, 16APSK, 32APSK.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці є ключовою передумовою для підвищення продуктивності, запобігання травматизму, професійним захворюванням та зниження загальної виробничої захворюваності, а також мінімізації економічних втрат, пов'язаних з цими аспектами. Успішне вирішення цих проблем можливе лише шляхом реалізації скоординованої політики у сфері охорони праці. Керівники та власники підприємств повинні неухильно дотримуватися встановлених норм безпеки для своїх працівників, враховуючи специфіку виробничих процесів, у рамках яких вирішуються питання безпеки праці. Це вимагає постійного контролю, навчання персоналу та впровадження сучасних технологій для створення максимально безпечного робочого середовища.

Розробка системи зв'язку міліметрового діапазону відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Обладнання приміщення та робочого місця

Сучасне виробництво характеризується постійною автоматизацією та оптимізацією технологічних процесів. У нинішніх економічних умовах практично кожне підприємство використовує комп'ютерну техніку для забезпечення своєї діяльності. З огляду на широке розповсюдження робіт, що виконуються з застосуванням комп'ютерів, законодавство України ретельно регламентує норми та вимоги щодо їх використання на підприємствах, особливо в сфері охорони праці. Це включає в себе такі нормативні документи, як ДСанПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015 та інші.

Приміщення, що використовуються для роботи з комп'ютерною технікою, повинні відповідати проєктній документації будівлі, яка пройшла необхідне погодження у відповідних державних інстанціях. Окрім цього, роботодавець зобов'язаний забезпечити дотримання санітарних норм і вимог щодо освітлення, мікрокліматичних умов (температури та вологості повітря), рівня вібрації та шуму, а також пожежної безпеки в робочому просторі. Детальні значення цих санітарних параметрів регламентуються чинними нормативно-правовими актами, зокрема будівельними, санітарними та протипожежними нормами і правилами. Ретельне дотримання цих вимог є запорукою створення безпечних та комфортних умов праці для працівників, що сприяє збереженню їхнього здоров'я та підвищенню продуктивності.

Організація робочого місця розробника системи зв'язку міліметрового діапазону були дотримані такі вимоги:

- робочі місця з відеотерміналами й ПК розміщуються на відстані не менш 1 м від стін зі світловими прорізами;
- відстань між бічними поверхнями відеотерміналів повинна бути не менше 1,2 м;

- відстань між тильною поверхнею одного відеотермінала й екраном іншого не повинна бути менше 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць повинен бути не менше 1 м.

Робоче сидіння (крісло) розробника має наступні основні елементи: сидіння, спинку й стаціонарні або знімні підлокітники.

Монітор і клавіатура розміщені на оптимальній відстані від очей користувача, що становить не менше 600 мм, з урахуванням розміру символів на екрані. Клавіатура розташована на окремій регульованій по висоті підставці, на відстані 100-300 мм від переднього краю столу, забезпечуючи можливість налаштування кута її нахилу в діапазоні від 5 до 15°.

Загальна площа робочого приміщення становить 19,5 м² та об'єм 58,5 м³. Кількість працівників у приміщенні – 4 особи, всі робочі місця комп'ютеризовані. На одного працівника в даному приміщенні припадає в середньому 4,9 (м²/ос.) робочої площі. Об'єм повітря на одного працівника припадає 14,6 м³. Відповідно до норм НПАОП 0.00-7.15-18, мінімальна площа приміщення для одного робочого місця з відеотерміналом має становити 6,0 м², а об'єм – 20,0 м³, виходячи з максимальної кількості працівників у зміні. Порівняльний аналіз фактичних розмірів приміщень виявив невідповідність встановленим нормам, що може мати негативний вплив на самопочуття та здоров'я працівників. У зв'язку з цим було прийнято рішення про перенесення одного комп'ютеризованого робочого місця до іншого приміщення.

Електробезпека приміщення

Приміщення, в якому здійснювалася розробка системи зв'язку міліметрового діапазону, класифікується як приміщення 1-го класу безпеки, що свідчить про відсутність підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. У даному приміщенні створені безпечні умови, що характеризуються сухістю повітря, низьким рівнем запиленості, підтриманням нормальної температури, наявністю ізольованих підлог та використанням обладнання з обмеженою кількістю заземлених елементів. На робочому місці з усього обладнання є металевий корпус системного блоку комп'ютера. У цьому корпусі передбачено

ізоляцію для забезпечення безпеки, а також наявний елемент для заземлення та провід зі заземлюючим проводом для приєднання до джерела живлення.

Електротехнічне обладнання, зокрема апаратура, кабельні лінії та розподільні пристрої будь-яких типів і рівнів напруги, гарантує стабільне функціонування як за звичайних умов експлуатації, так і в разі виникнення коротких замикань, стрибків напруги та перевантажень. Для забезпечення цієї надійності передбачено використання сучасних систем захисту, регулярне технічне обслуговування та контроль стану обладнання кваліфікованим персоналом. Такий підхід мінімізує ризики виходу обладнання з ладу та забезпечує безперебійність виробничих процесів.

Для забезпечення безпеки застосовані такі технічні рішення:

- струмопровідні частини недоступні (використовується схована проводка, або кабель прокладений у спеціальних ринвах);
- струмопровідні частини ізольовані за допомогою ізоляції, опір якої не менше 1 кОм/В, і піддаються регулярному контролю та обслуговуванню;
- напруга в системі освітлення становить 220 В та має заземлену нейтраль;
- використання запобіжників та автоматичних вимикачів для захисту від коротких замикань і перевантажень;
- заземлення всіх металевих частин обладнання та електричних систем для ефективного відведення надлишкової напруги та запобігання ураженню електричним струмом;
- застосування високоякісних кабелів, які відповідають стандартам безпеки та електробезпеки;
- постійний нагляд і планова профілактика електротехнічного обладнання та ізоляції для попередження можливих проблем.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат

Мікрокліматичні умови в приміщенні, а саме температура, швидкість руху

повітря та рівень вологості, істотно впливають на підтримання працездатності людини. Для ефективного функціонування організму необхідно забезпечити належне відведення тепла, що утворюється в процесі життєдіяльності працівника, в навколишнє середовище. Зниження температури в офісному просторі може призвести до надмірної тепловіддачі та переохолодження. За високих температур основним механізмом тепловіддачі є випаровування поту. Для нормального перебігу фізіологічних процесів відносна вологість повітря не повинна перевищувати 60%.

Робота розробника системи зв'язку міліметрового діапазону згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу за енерговитратами відноситься до категорії 1а. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – 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

У приміщенні для підтримання оптимального мікроклімату функціонує система кондиціонування повітря з індивідуальним налаштуванням температурного режиму, централізована система опалення, а також регулярно проводиться вологе прибирання.

Склад повітря робочої зони

Для створення належних умов праці, окрім забезпечення комфортного мікроклімату, необхідно також подбати про якість повітря в робочій зоні. У процесі виробничої діяльності в повітря приміщення можуть потрапляти різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах. До шкідливих відносяться речовини, які при порушенні вимог безпеки можуть призвести до виробничих травм, професійних захворювань або негативно вплинути на стан здоров'я працівників як безпосередньо під час

роботи, так і в довгостроковій перспективі, включаючи можливі наслідки для майбутніх поколінь.

В приміщенні, де здійснюється розробка системи зв'язку міліметрового діапазону, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	25	10	4
Озон	0,1	0,03	1
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – 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

Підтримання належної якості повітря в робочій зоні забезпечується комплексом заходів, що включає: використання системи кондиціонування для регулювання температури, вологості та рівня чистоти повітря; регулярне провітрювання з метою видалення шкідливих домішок, таких як пил, газу та пари; а також систематичне вологе прибирання для ефективного усунення пилу, бруду та мікроорганізмів з поверхонь. Всі ці дії є необхідними для збереження здоров'я працівників та створення сприятливого робочого середовища.

Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень характеризується як кількісними, так і якісними параметрами. Основними кількісними показниками є світловий потік,

сила світла, яскравість та освітленість. Ключові якісні характеристики візуального сприйняття в робочому середовищі включають фон, контраст між об'єктом і фоном, а також видимість. Недостатній або надмірний рівень освітлення, нерівномірний розподіл світла в полі зору, пульсація світла та спотворення кольорів освітлюваних об'єктів можуть спричиняти зорову та загальну втоми. Занадто висока яскравість джерел світла може викликати головний біль, появу «мушок» перед очима та погіршення гостроти зору. Відблиски можуть призводити до тимчасового засліплення. Забруднені вікна та світильники знижують якість освітлення. Сліпучі лампи або різкі тіні можуть дезорієнтувати працівника. Усі ці фактори становлять потенційні ризики травматизму та можуть сприяти розвитку професійних захворювань.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018) зазначені у таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 - 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	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Робоче місце обладнано таким чином, щоб запобігти прямому потраплянню світла в очі працівника. Для усунення небажаних світлових відблисків використовується обладнання з неблискучою (матовою) поверхнею. З метою захисту органів зору від прямого сонячного або штучного світла на вікнах встановлено захисні козирки та жалюзі. Застосовується система регулювання інтенсивності штучного освітлення залежно від рівня природного світла, а також можливість освітлення лише необхідних для виконання завдань зон приміщення за допомогою відповідних вимикачів. Для забезпечення якісного освітлення важливо максимально використовувати наявне природне світло, регулярно

проводити очищення вікон від забруднень та своєчасно замінювати перегорілі лампи.

Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Норми шумового навантаження на працівника в процесі розробки системи зв'язку міліметрового діапазону наведені в табл.5.5.

Таблиця 5.5 - Рівень звукового тиску

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

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

Виробничі випромінювання

Сучасне комп'ютерне обладнання характеризується високою енергоефективністю. До його складу входять різноманітні електричні та радіоелектронні пристрої, що функціонують на різних фізичних принципах. У процесі роботи ця техніка генерує навколо себе електричні та магнітні поля в широкому діапазоні частот та з різним просторовим розподілом. До потенційно небезпечних факторів також належать електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону та електромагнітні поля, що можуть створюватися іншими джерелами в робочому середовищі з комп'ютерною технікою. Вплив цих факторів на здоров'я працівників потребує впровадження відповідних заходів безпеки та постійного контролю.

Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (Е), В/м	за магнітною складовою (Н), А/М	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0... 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 В/м

З метою мінімізації негативного впливу електромагнітного поля на розробника необхідно використовувати виключно сертифіковане та якісне комп'ютерне обладнання, що відповідає чинним стандартам безпеки. Крім того, суворе дотримання регламентованого часу роботи за персональним комп'ютером є обов'язковою умовою. Важливим є також оптимальне розміщення робочого місця відносно джерел ЕМП та інших працівників для мінімізації колективного впливу.

5.3 Пожежна безпека

Дане виробниче приміщення класифікується за пожежною небезпекою як категорія «Д», що означає наявність виключно негорючих матеріалів та речовин, які перебувають у холодному стані. За ступенем вогнестійкості ця ділянка належить до II ступеня, де несучі та огорожувальні конструкції виконані з

природного або штучного бетону чи залізобетону. Мінімальні вимоги до межі вогнестійкості приміщення механічного цеху представлені у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 - Мінімальні межі вогнестійкості приміщення

Максимальна границя вогнестійкості / максимальна границя							
Стіни				Колони	Драбінні площадки, балкони	Плити, ін. несучі конструкції перекрытия	Елемент и покрытия
Несучі	Самонесучі	Зов. несучі	Внутр.не сучі				
2/0	1/0	0,25/0	0,25/0	2/0	1/0	0,75/0	0,5/0

Технічні рішення системи запобігання пожежі

На робочому місці дослідника причинами пожежі можуть бути: коротке замикання (виникає при пошкодженні ізоляції проводів та їхньому з'єднанні, що призводить до різкого зростання струму та сильного нагрівання), перевантаження електромережі (підключення до однієї розетки надмірної кількості електроприладів, що перевищує допустиме навантаження на проводку), несправність електрообладнання (пошкодження, зношеність або неправильна експлуатація електроприладів, розеток, вимикачів, розподільних щитів), погані контакти в електричних з'єднаннях (ненадійні або окислені з'єднання проводів, що призводять до підвищеного опору, нагрівання та іскріння), куріння в заборонених місцях, використання несправного обладнання (експлуатація обладнання з дефектами, що можуть призвести до займання) тощо.

Система запобігання пожежі включає наступні технічні рішення:

1. Монтаж кабелів у металевих коробах, гофротрубах з негорючих матеріалів або з використанням кабелів з негорючою ізоляцією для запобігання займання електропроводки.

2. Встановлення автоматичних вимикачів (автоматів) відповідного номіналу в електричних щитах для захисту від надструмів та коротких замикань.

3. Періодичні огляди та перевірки електророзеток, вимикачів, світильників та офісної техніки кваліфікованим персоналом для виявлення та усунення можливих несправностей.

4. Визначення спеціально обладнаних зон для куріння, оснащених

негорючими попільничками, та розміщення попереджувальних знаків про заборону куріння в інших місцях.

5. Обмеження кількості горючих матеріалів на робочих місцях, їх зберігання у металевих шафах або стелажах.

6. Заборона використання саморобних або несправних нагрівальних приладів, контроль за їх розміщенням на безпечній відстані від горючих матеріалів та їх відключення після закінчення робочого дня.

Технічні рішення системи протипожежного захисту

Технічні рішення системи протипожежного захисту є комплексом інженерних заходів та обладнання, спрямованих на виявлення пожежі, сповіщення про неї, обмеження її розповсюдження та забезпечення безпечної евакуації людей, а також гасіння пожежі на початковій стадії. Ці рішення поділяються на активні та пасивні системи.

Активні системи протипожежного захисту включають обладнання, яке спрацьовує автоматично або за командою людини для виявлення та ліквідації пожежі:

1) автоматична пожежна сигналізація – комплекс технічних засобів для виявлення пожежі на ранній стадії. Включає пожежні сповіщувачі (димові, теплові, полумєневі, газові), приймально-контрольні прилади, лінії зв'язку та системи оповіщення;

2) системи димовидалення та протидимного захисту – комплекс обладнання для видалення диму та токсичних продуктів горіння з приміщень та шляхів евакуації, а також для створення надлишкового тиску повітря в сходових клітках та ліфтових шахтах, що запобігає задимленню.

3) первинні засоби пожежогасіння - переносні та пересувні вогнегасники різних типів (порошкові, пінні, вуглекислотні), пожежні щити з інструментом (ломи, багри, лопати), азбестові полотна (кошми). В приміщенні розташовані порошкові вогнегасники, які є універсальними та підходять для гасіння пожеж класів А (тверді горючі речовини), В (рідкі горючі речовини), С (газоподібні горючі речовини) та Е (електрообладнання під напругою до 1000 В). Для офісу

площею до 20 м² зазвичай достатньо одного вогнегасника ВП-2 або ВП-3. Кількість вогнегасників збільшується залежно від площі та категорії пожежної небезпеки приміщення.

Пасивні системи протипожежного захисту включають будівельні конструкції, матеріали та планувальні рішення, спрямовані на запобігання поширенню вогню та диму:

- шляхи евакуації та евакуаційні виходи – безпечні маршрути для виходу людей з будівлі у випадку пожежі, які мають відповідну ширину, висоту, освітлення та позначення.

- облицювальні та оздоблювальні матеріали з нормованими показниками горючості та димоутворення - застосування матеріалів, що не сприяють швидкому поширенню вогню та утворенню значної кількості диму.

- протипожежні відстані - нормовані відстані між будівлями та спорудами для запобігання перекиданню вогню.

Ефективна система протипожежного захисту передбачає комплексне застосування як активних, так і пасивних заходів, що проектуються та реалізуються з урахуванням вимог чинних нормативних документів, пожежної небезпеки об'єкта та його функціонального призначення. Регулярне технічне обслуговування та перевірка працездатності всіх елементів системи є обов'язковою умовою її надійної роботи.

ВИСНОВОК

На основі аналізу існуючих міжнародних стандартів обміну даними в супутникових мережах показані перспективи використання стандартів DVB-S2 і DVB-S2X при розробці модемів станцій супутникового зв'язку ММДХ.

Розроблено імітаційні моделі в середовищі Matlab/simulink для вивчення спектральної та енергетичної ефективності сигнально-кодових структур на основі багатопозиційних типів модуляції PSK та APSK та завадостійкого каскадного кодування BCH+LDPC в уніфікованих адаптивних моделах станцій супутникового зв'язку діапазону ММДХ.

Розроблено пропозиції щодо забезпечення високошвидкісної передачі даних в частотних діапазонах Ka/Q з використанням орбітального угруповання спеціалізованих супутників зв'язку на високих еліптичних орбітах.

Обґрунтовано використання квазістаціонарної моделі супутникового каналу ММДХ з використанням супутників зв'язку на високих еліптичних орбітах для аналізу ефективності запропонованих сигнально-кодових конструкцій та методів адаптації до умов поширення радіохвиль за типом СКК, рівнем сигналу та швидкістю інформації.

Показана ефективність використання режиму адаптивного кодування та модуляції для високошвидкісної передачі даних у частотних діапазонах Ka/Q.

Виявлено залежність збільшення втрат енергії зі збільшенням спектральної ефективності сигналів APSK за рахунок зменшення коефіцієнта «згладжування» спектра фільтра.

Досліджено ефективність алгоритму цифрового попереднього передспотворення сигналів АПСК, що дозволяє значно послабити вимоги до лінійності підсилювача потужності передавача. Використання запропонованого алгоритму в досліджуваному нелінійному тракті дає зниження індексу EVM мінімум на 10 дБ.

Запропоновано алгоритми побудови та програмної реалізації модемів з гнучкою архітектурою на основі SDR-технологій для станцій супутникового зв'язку з адаптацією до заводового середовища за енергетичною та інформаційною швидкістю, що забезпечують високонадійну передачу дискретних повідомлень з підвищеними вимогами до завадостійкості.

Доцільно продовжувати роботи в напрямку, пов'язаному з використанням багатопозиційних типів фазової та амплітудно-фазової модуляції та завадостійкого кодування в системах супутникового зв'язку міліметрового діапазону хвиль та оптимізацією сигнально-кодових структур для уніфікованих модемів з гнучкою архітектурою та адаптацією з точки зору енергії та швидкості передачі даних.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BER	– (bit error rate) частота помилок по бітам
BPSK	– (binary phase-shift keying) двійкова фазова маніпуляція
C/N	– носійна/шум
C/I	– носійна/інтерференційна завада
CRC	– (Cyclic Redundancy Check) циклічний надмірний код
DAMA	– (Demand Assigned Multiple Access) множинний доступ, що призначається за вимогою
DVB-DSNG	– (Digital Video Broadcasting - Digital satellite news gathering) цифрове відеомовлення - цифровий супутниковий збір інформації
DVB-S	– (digital video broadcasting-satellite) цифрове супутникове відеомовлення
DVB-SH	– (digital video broadcasting- satellite services for to Handhelds) стандарт супутникового цифрового телемовлення для мобільних пристроїв
IP	– (Internet Protocol) протокол мережевого рівня
LDPC	– (Low Density Parity Check Codes) код з низькою щільністю перевірок на парність
MODCOD	– МОДКОД, модуляція и кодування
MPEG	– (Motion Pictures Expert Group) експертна група по рухомому зображенню
PARP	– (Pick/average ratio power) відношення пікової потужності сигналу $P_{\text{пik}}$ до середньої потужності P_{cp} (пik-фактор відношення потужностей)
QAM	– (Quadrature-amplitude modulation) квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	– (Quadrate Phase Shift Keying) квадратурна фазова модуляція
R_s	– Швидкість символів передачі

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ETSI TR 102 376 v1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
2. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive services, News Gathering and other broadband satellite applications.
3. Maral. G. VSAT Networks. – Wiley; 2nd edition. – 2003. – 294 p.
4. ETSI EN 301 545-2. Digital Video Broadcasting (DVB). Second generation DVB Interactive Satellite system (DVB-RCS2). Part 2: Lower Layers for Satellite standard.
5. RF signal processing, June 2002, Output Back-Off Requirements For Root-Raised, Cosine-Filtered Digital Signals // <http://defenseelectronicsmag.com/sitefiles/defenseelectronicsmag.com/files/archive/rfdesign.com/images/archive/0602Seybold50.pdf>.
6. Seybold J. S. Crest Factors for QAM Signals // <http://mathscinotes.com/2012/11/crest-factors-forqam-signals>.
7. Chayratsami P., Thuaykaew S. The Optimum Ring Ratio of 16-APSK in LTE Uplink over Nonlinear System // http://www.icact.org/upload/2013/0554/20130554_Journal_B.pdf.
8. Fosserier M., Mihaljevich, H.Imai, «Reduced complexity iterative decoding of low density parity check codes based on belief propagation», IEEE Trans. on Comm. vol. 47. № 5. pp. 673-680. May 1999.
9. Richardson T., Shokrollahi M., Urbanke R. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes // IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 47, pp. 638–656, Feb. 2001.
10. Papaharalabos S., Papaleo M., Neri M., P. T. Mathiopoulos P. T., DVB-S2 LDPC decoding using robust check node update approximations // IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, VOL. 54, NO. 1, MARCH 2008.

11. Jordanova L., Laskov L., Dobrev D.. Jordanova et al.: Influence of BCH and LDPC Code Parameters on the BER Characteristic of Satellite DVB Channels // Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 4, No. 1, 2014, 591-595.
12. Gardikis, Georgios & Zotos, Nikos & Kourtis, Anastasios. (2009). Satellite Media Broadcasting with Adaptive Coding and Modulation. Int. J. Digital Multimedia Broadcasting. 2009. 10.1155/2009/879290.
13. Baldi et al.: A comparison between APSK and QAM in Wireless Tactical Scenarios for Land Mobile Systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – Vol. 317. – p. 2 – 14.
14. Konstantinos P. Liolis, Riccardo De Gaudenzi, Nader Alagha, Alfonso Martinez, and Albert Guillén i Fàbregas (2010). Amplitude Phase Shift Keying Constellation Design and its Applications to Satellite Digital Video Broadcasting, Digital Video, Floriano De Rango (Ed.), ISBN: 978-953-7619-70-1.
15. De Gaudenzi R., Guillén i Fàbregas A. & Martinez A. Performance analysis of turbo-coded APSK modulations over nonlinear satellite channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2006. V. 5, № 9. P. 2396–2407.
16. Andraud, Martin. (2016). Solutions for the self-adaptation of wireless systems.
17. Lewis Davies, Paul Winter. OFCOM Study of current and future receiver performance Final Report 11th January 2010
18. Sung W., Kang S., Kim P., D. Chang, D. Shin. Performance analysis of APSK modulation for DVB-S2 transmission over nonlinear channels // International Journal of Satellite Communications. – 2009. – Vol. 27. – p. 295 – 311.
19. Shafik, Rishad & Rahman, Mohammad & Islam, Razib & Ashraf, Nabil. (2006). On the error vector magnitude as a performance metric and comparative analysis. 10.1109/ICET.2006.335992.
20. Testing and Troubleshooting Digital RF Communications Receiver Designs / Application Note 1314 Xilinx Series 7 FPGAs Data Sheet: Overview. // XILINX [электронный ресурс] – 2020 – URL: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds180_7Series_Overview

21. W. Richard Middlestead. Digital communications with emphasis on data modems. Theory, Analysis, Design, Simulation, Testing, and Applications. // John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2017.

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

23. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.

24. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>

25. 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>

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. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>

28. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npraop_0_00-7_15-18_01_ua.php

29. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

30. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний

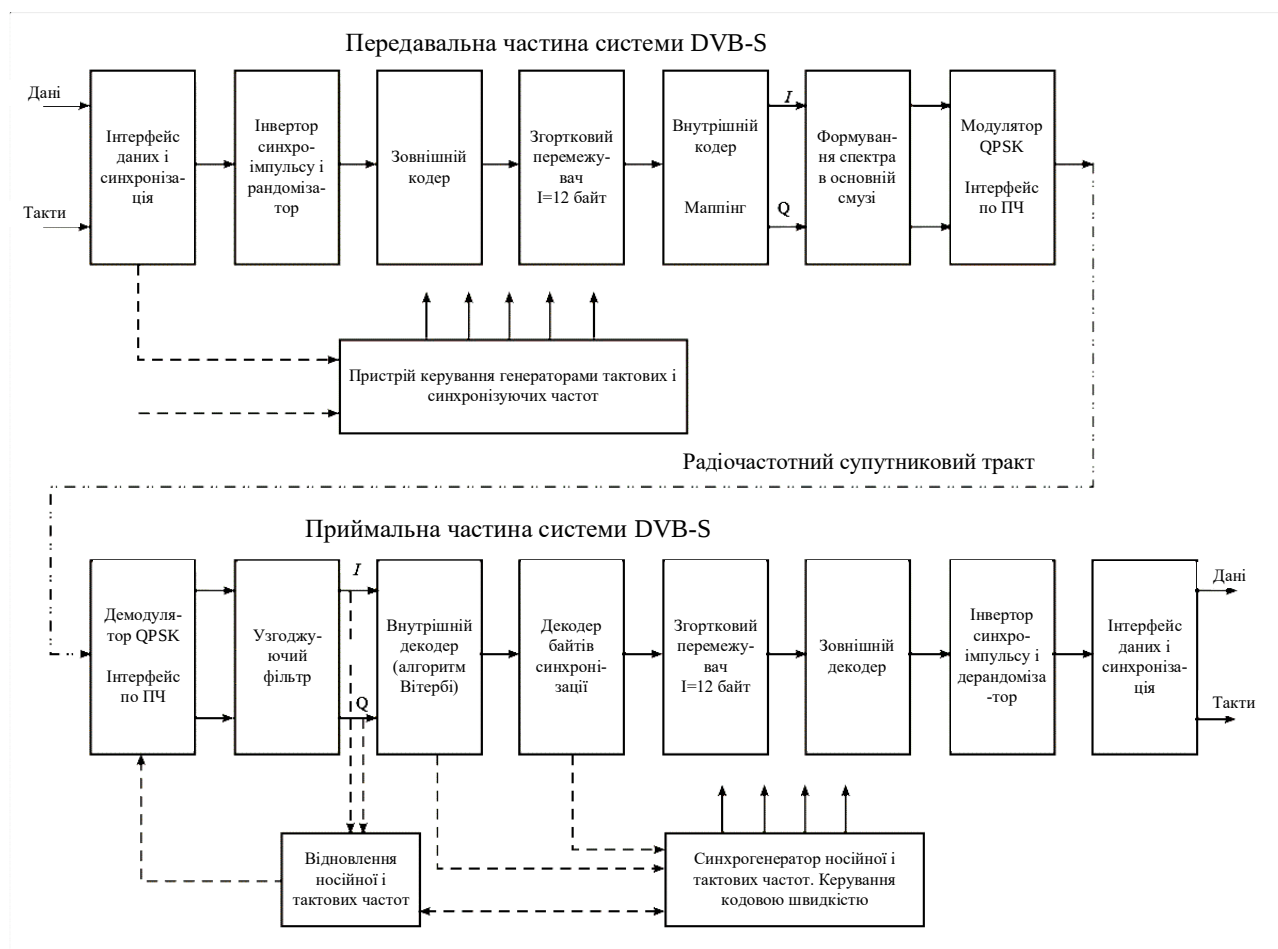
ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>

31. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

32. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

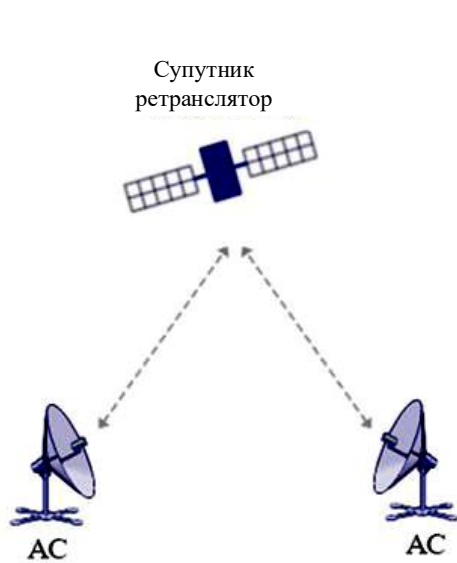
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

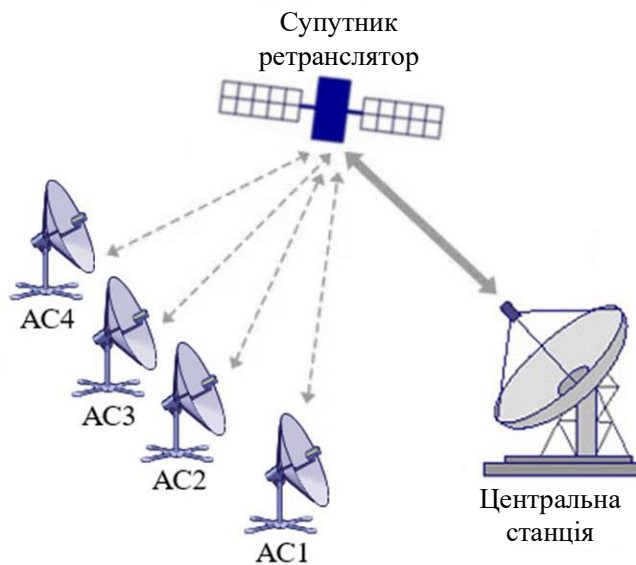


Структурна схема блоків DVB-S

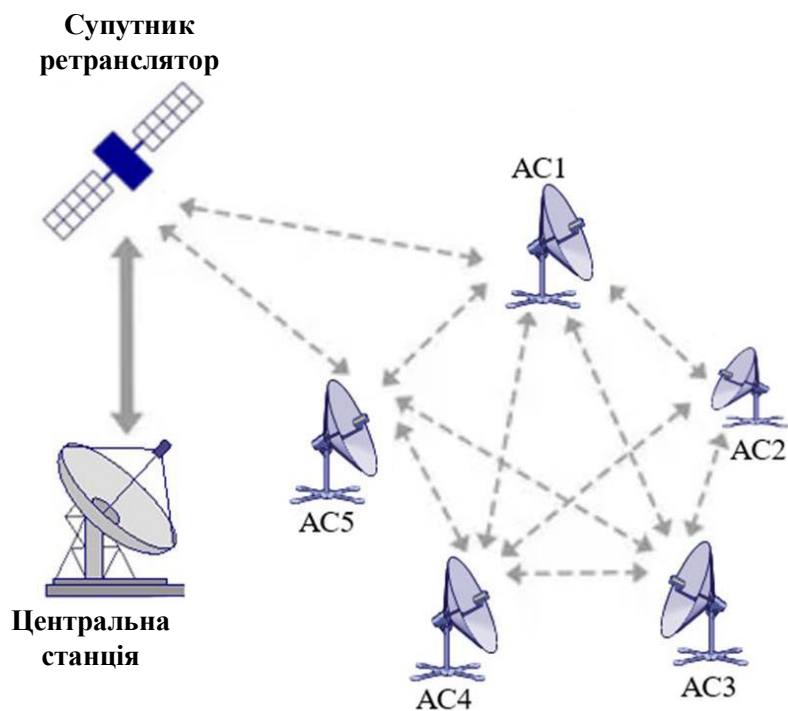
Топології мережі ММДХ



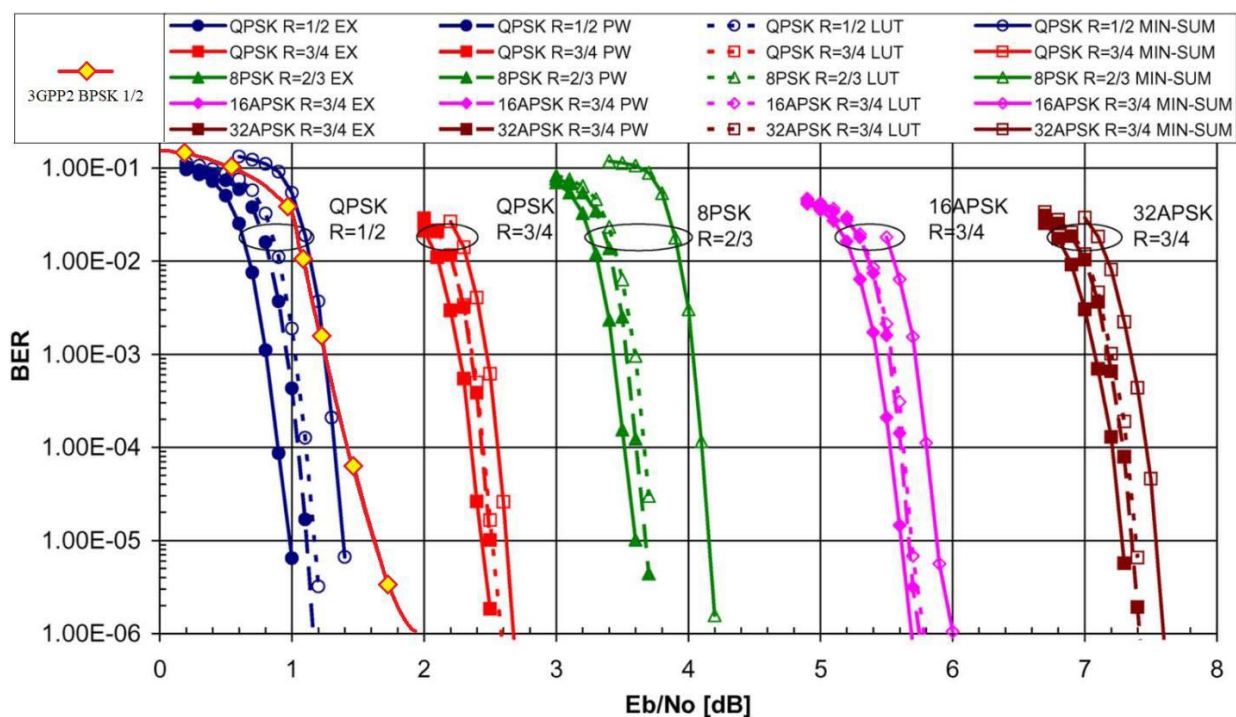
Мережа «точка-точка»



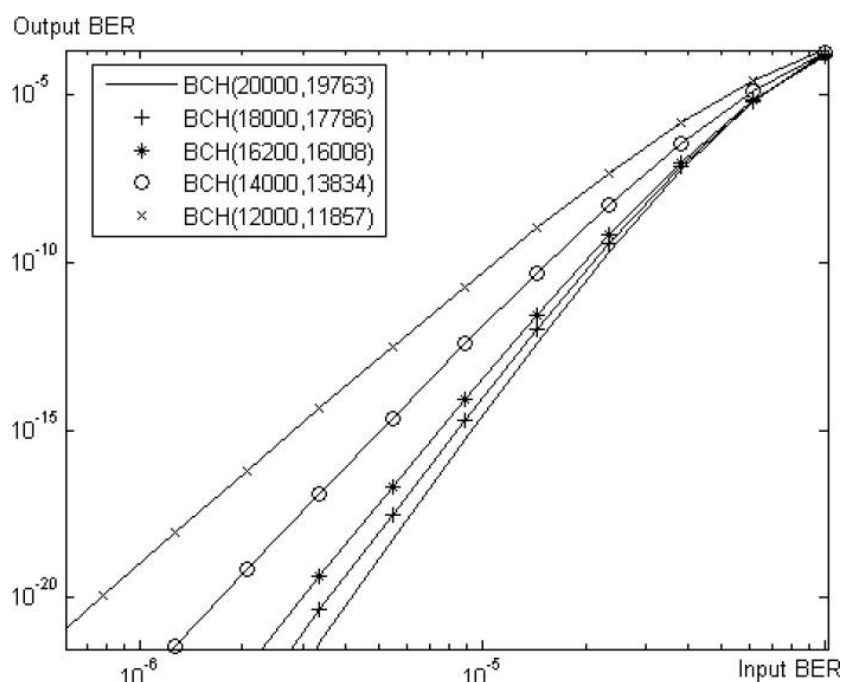
Мережа з топологією зірка



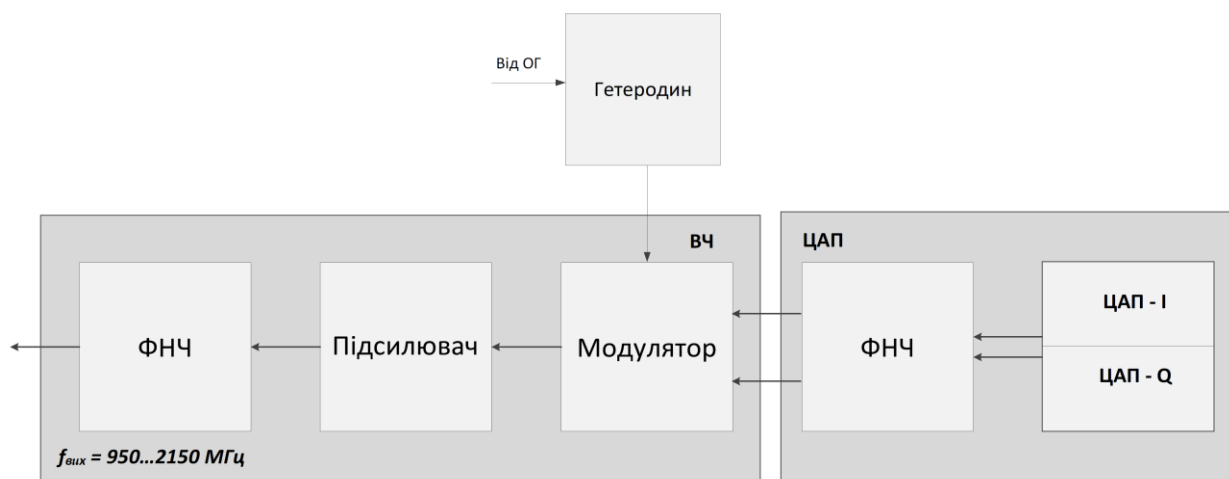
Мережа за топологією "кожен з кожним"



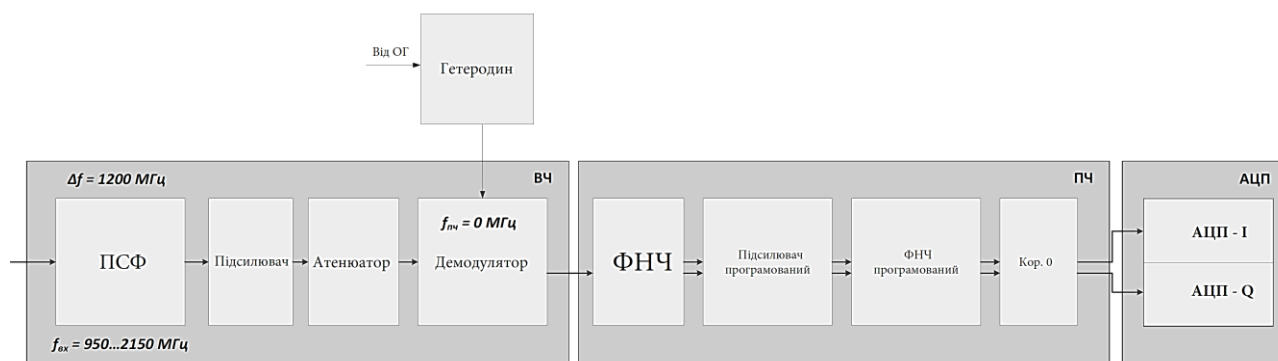
Графіки завадостійкості для різних сигнально-кодових структур



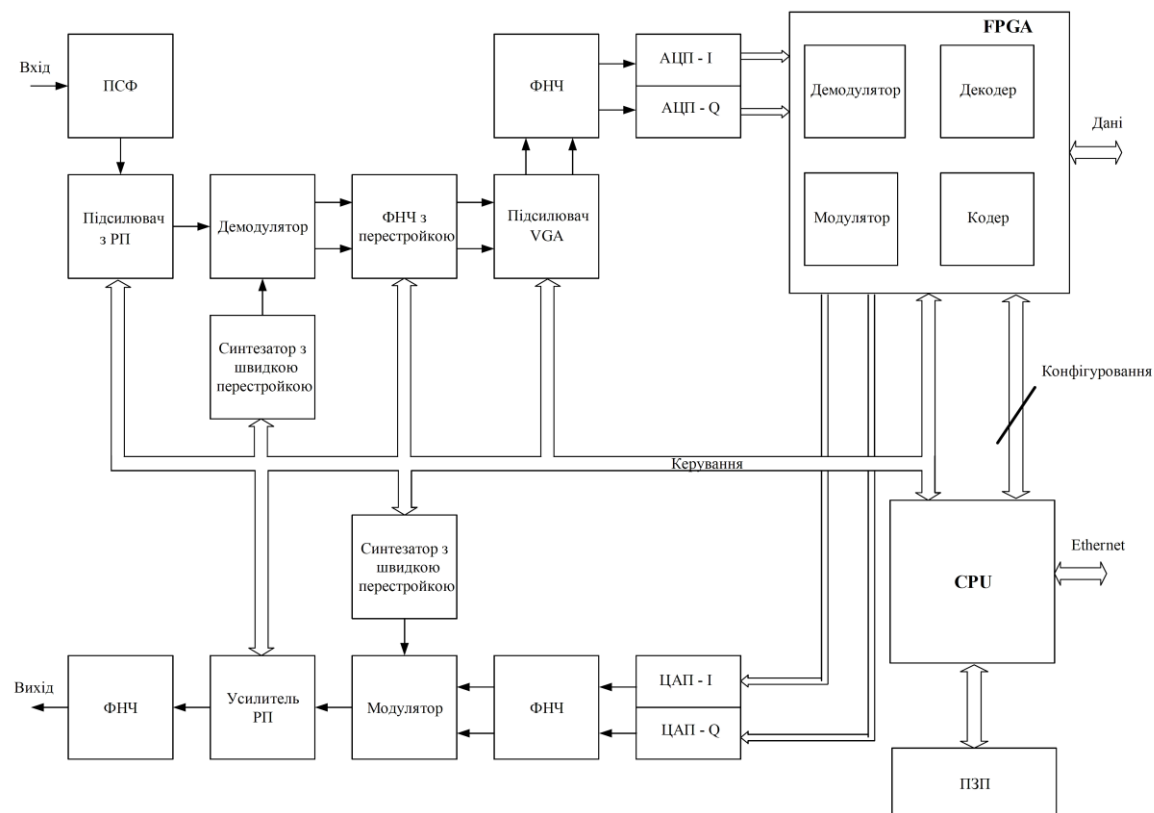
Залежність ймовірності помилки на виході зовнішнього декодера BCH від BER внутрішнього декодера LDPC



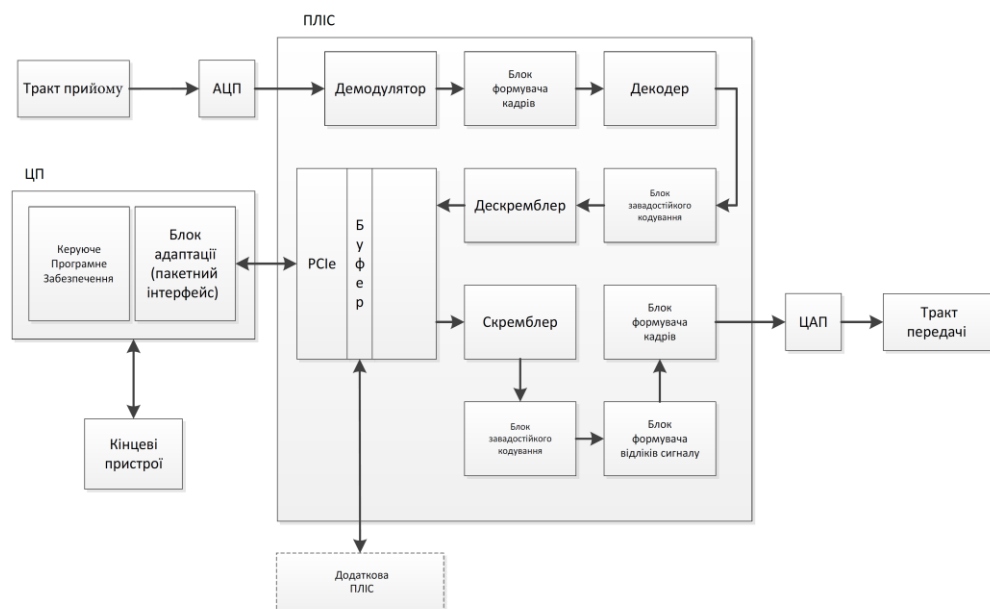
Структурна схема модему тракту передачі



Структурна схема приймального тракту модему

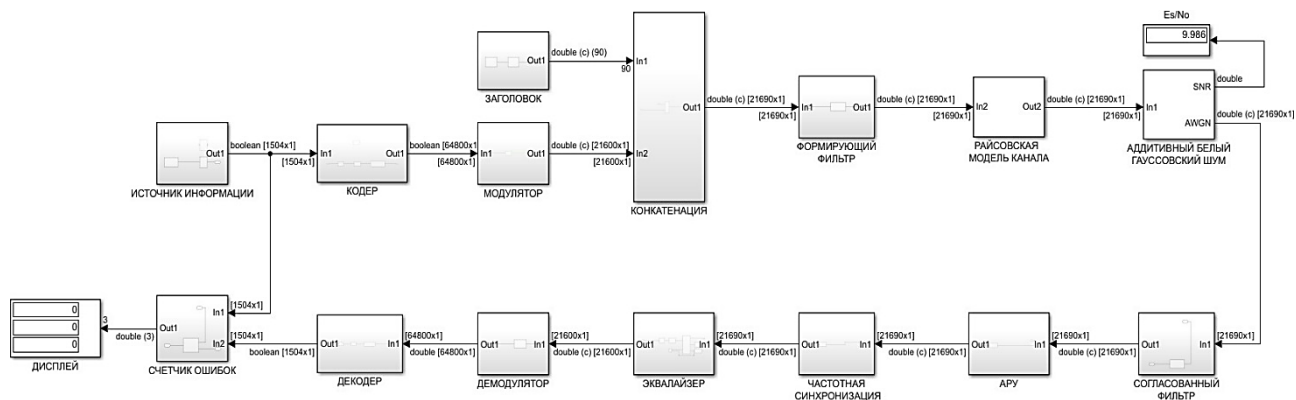


Структурна схема модему станцій супутникового зв'язку ММДХ

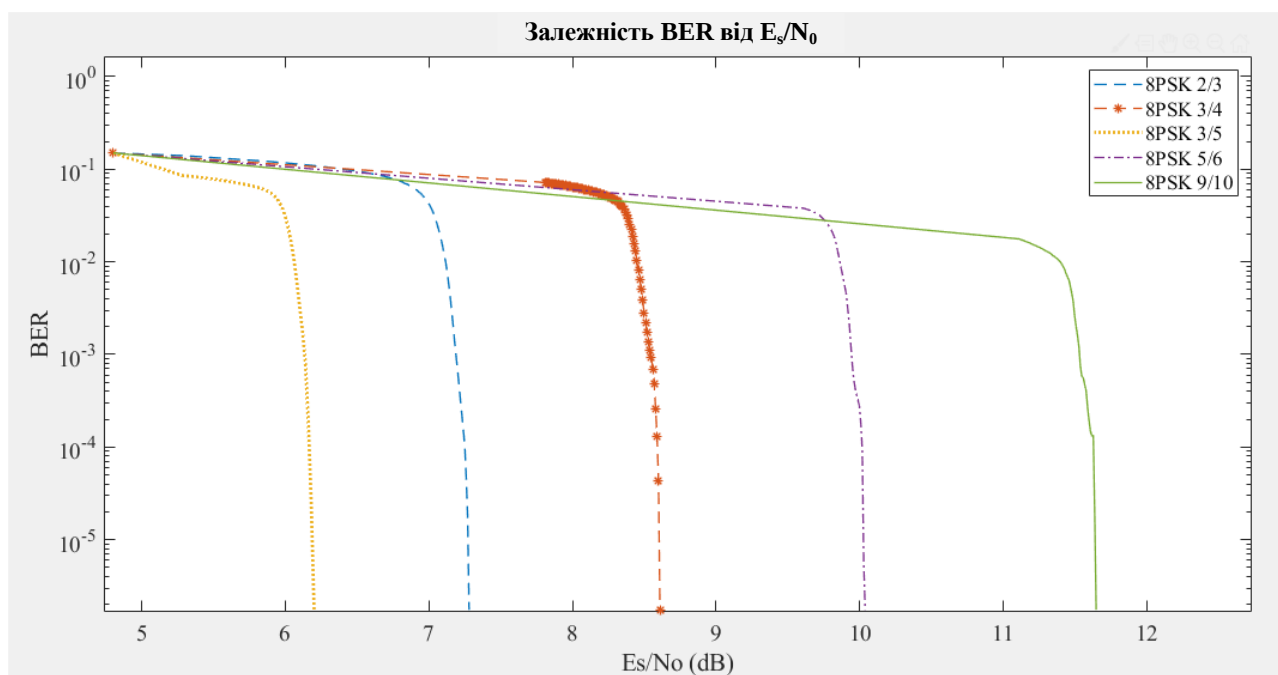


Структурна схема апаратної платформи супутникового модему Ka/Q-діапазону

Комп'ютерне моделювання



Структурна схема моделі модему в Simulink



Графіки залежності BER від відношення сигнал/шум E_b/N_0

Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система зв'язку міліметрового діапазону

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мс
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 3,4%

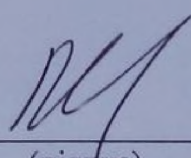
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

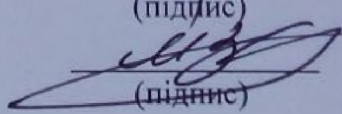
- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

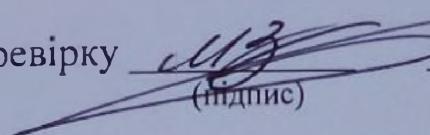
Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)


(підпис)

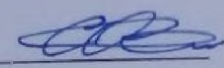
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

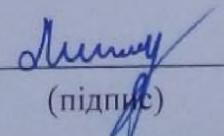
Керівник


(підпис)

Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Муха О.В.

(прізвище, ініціали)