

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ  
СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Р.С. Одарченко  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ  
“БАКАЛАВР”**

**Тема: “Модем системи передачі даних ACARS в діапазоні коротких хвиль”**

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ Домаєв О.С.  
(підпис)

**Керівник :** \_\_\_\_\_ Климчук В.П.  
(підпис)

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_ Бахтіяров Д.І.  
(підпис)

**Київ 2021**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Одарченко Р.С.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання дипломної роботи

Домаєва Олександра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи (проекту): «Модем системи передачі даних ACARS в діапазоні коротких хвиль»

затверджена наказом ректора від «06» квітня 2021 р. №559 / ст

2. Термін виконання роботи: з 17.05.2021 р. по 20.06.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: ширина смуги пропускання РПП: 15 кГц; швидкість передачі -  $\geq$  9600 б/с; вид модуляції сигналу РПДП– OFDM; робочий діапазон системи передачі– 2.....30 МГц

4. Зміст пояснювальної записки: вступ; принципи побудови системи передачі даних ACARS; система передачі на основі технології OFDM

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди презентації в програмному пакеті MS PowerPoint

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів диплому	17.05.2021- 20.05.2021	Виконано
2	Вступ	21.05.2021- 22.05.2021	Виконано
3	Написання першого розділу	23.05.2021- 27.05.2021	Виконано
4	Написання другого розділу	28.05.2021- 03.06.2021	Виконано
5	Написання третього розділу	04.06.2021- 09.06.2021	Виконано
6	Усунення недоліків дипломної роботи	10.06.2021- 14.06.2021	Виконано

8. Дата видачі завдання: “15 ” 04 2021 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Климчук В.П.  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Домаєв О.С.  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Модем системи передачі даних ACARS в діапазоні коротких хвиль»: 44 сторінки, 11 рисунків, 7 таблиць, 17 використаних джерел.

**Ключові слова:** СИСТЕМА ACARS, СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, ВЧ-РАДІОЗВ'ЯЗОК, ТЕХНОЛОГІЯ OFDM, OFDM-МОДЕМ, БАГАТОПРОМЕНЕВЕ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ, ПРЕФІКС.

**Об'єкт дослідження** – процес використання системи передачі даних ACARS в умовах відсутності наземної інфраструктури при польотах над океаном та малонаселених районах.

**Предмет дослідження** – модем системи передачі даних ACARS в діапазоні коротких хвиль.

**Мета дипломної роботи:** розрахунок параметрів та розробка модема на основі технології OFDM.

Метод дослідження – схематичне та структурне моделювання пристрою та математичні розрахунки системи.

Установлено, що розроблений OFDM-модем має відповідні до сучасних потреб характеристики та є перспективним для використання в авіаційних системах передачі даних у високочастотному діапазоні.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців авіаційних конструкторських бюро.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ СИСТЕМОЮ ACARS ....	9
1.1. Призначення системи передачі даних ACARS.....	9
1.2. Принцип роботи ACARS.....	11
1.3. Зона покриття.....	13
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	14
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО ВЧ РАДІОКАНАЛУ.....	16
2.1. Методи передачі даних на далекі і наддалекі відстані.....	16
2.2. Способи підвищення ефективності радіозв'язку в діапазоні коротких хвиль.....	21
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	24
РОЗДІЛ 3 Системи з модуляцією OFDM.....	25
3.1. Принцип роботи системи з ортогональним частотним мультиплексуванням каналів.....	25
3.2. Розрахунок параметрів сигналу OFDM.....	30
3.3. Апаратурна реалізація OFDM – модему високочастотного діапазону...	35
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	41
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ЗШПФ – Зворотне швидке перетворення Фур'є;
- МД – Метод доступу;
- МСІ – Міжсимвольна інтерференція;
- ПЧК – Просторово-часове кодування;
- СКМ – Системний критерій мобільності;
- ФЙП – Фатальна ймовірність похибки;
- ФМ – Фазова модуляція;
- ФЩЙ – Функція щільності ймовірності;
- ЦП – Циклічний префікс;
- ЦР(З)М – Цифрова радіосистема (звукового) мовлення;
- ШПФ – Швидке перетворення Фур'є;
- ШСД – широкосмуговий доступ;
- OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Мультиплексування ортогонально-розділених піднесучої;
- OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Багатостанційний доступ з використанням ортогонально-розділених піднесучих;
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation – Квадратурна амплітудна модуляція;
- QEF – Quasi Error-Free – Квазібезпохибковий режим передачі;
- QoS – Quality of Service – Показник якості зв'язку;
- QPSK – Quadrature Phase Shift Keying – Квадратурна фазова маніпуляція;
- RA – Rural Area – Модель сільської місцевості;
- S-OFDMA – Scalable-OFDMA – Принцип забезпечення можливості OFDMA системи до роботи в смугах частот різної ширини за рахунок зміни кратності ШПФ;
- SINPFEMO – Оцінка якості сигналу, що враховує: Strength (силу сигналу), Interference (рівень перешкод), Noise (шум), Propagation disturbance (порушення умов розповсюдження), Fading (завмирання), Efficiency of modulation (якість модуляції) M (глибина модуляції) Overall (загальну оцінку);
- SISO – Single Input Single Output – Техніка використання одного радіотракту на кожній стороні зв'язку;

## ВСТУП

**Актуальність теми** дипломної роботи полягає в наступному. Стійкий і надійний зв'язок між повітряним судном і наземними станціями життєво важлива для авіації. Коли ми говоримо про авіаційний радіозв'язок, як правило, маємо на увазі зв'язок між пілотом і диспетчером управління повітряного руху, але ж існує й інша не менш важлива інформація, якою необхідно обмінюватися з екіпажем повітряного судна, який виконує політ. Безумовно, майже будь-яку інформацію можна передати по радіо голосом, але якщо мова йде про об'ємну інформацію, у екіпажа просто може не бути на це часу, крім того, якби всі повідомлення передавалися голосом, в районах з високою інтенсивністю повітряного руху елементарно не вистачило б частот в авіаційному діапазоні. Ще одним серйозним недоліком голосової радіозв'язку є дуже висока ймовірність помилки при прийомі інформації, по-перше, радіозв'язок схильний до різного роду перешкод, що погіршує сприйняття, а по-друге - горезвісний людський фактор: люди помиляються і пілоти не виняток, почувши одну цифру, людина може записати іншу, а якщо взяти до уваги те, що в більшості випадків зв'язок ведеться англійською мовою, ймовірність помилок ще більше зростає. Все це вкрай негативно впливає на безпеку польотів. Для усунення приведених обмежень передбачено використання авіаційних автоматизованих систем передачі даних. Однією з реалізацій автоматизованої системи передачі даних є система передачі даних ACARS (Адресно-звітна система авіаційного зв'язку).

Система ACARS дозволяє здійснювати обмін повідомленнями між повітряним судном і наземною станцією в закодованому вигляді, а для користувача ці повідомлення представлені в текстовому вигляді. Інформація в системі ACARS може передаватись по одному із трьох каналів:

1. Радіоканал діапазону дуже високих частот(ДВЧ). Для цього використовуються штатні бортові та наземні радіостанції ДВЧ системи керування повітряним рухом. Для передачі даних виділяються окремі частоти. При цьому

дальність зв'язку і, відповідно, передачі даних при висоті польоту 10 км становить 300.....350 км, що значно обмежує можливості системи.

2. Над океанічними районами та районами, не забезпеченими мережею авіаційного ДВЧ радіозв'язку, передача даних проводиться по каналу радіозв'язку діапазону високих частот(ВЧ). При цьому забезпечується велика дальність зв'язку(порядка 3000....3500 км), але якість передавання даних досить низка внаслідок особливостей розповсюдження радіосигналу у діапазоні коротких хвиль. Швидкість передачі також мала.

3. Крім передачі даних по каналах ДВЧ та ВЧ радіозв'язку на наземні радіостанції, може застосовуватися супутниковий канал передачі даних.

Таким чином, в умовах відсутності засобів радіозв'язку діапазону дуже високих частот є перспективним використання засобів радіозв'язку діапазону коротких хвиль. Тому задача розробки модема для засобів ВЧ–зв'язку є актуальною.

**Об'єкт дослідження** – процес використання системи передачі даних ACARS в умовах відсутності наземної інфраструктури при польотах над океаном та малонаселених районах.

**Предмет дослідження** – модем системи передачі даних ACARS в діапазоні коротких хвиль.

**Апробація отриманих результатів.** Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2021 р.



# РОЗДІЛ 1

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ СИСТЕМОЮ ACARS

### 1.1. Призначення системи передачі даних ACARS

Стійкий і надійний зв'язок між повітряним судном і наземними станціями життєво важлива для авіації. Коли ми говоримо про авіаційний радіозв'язок, як правило, маємо на увазі зв'язок між пілотом і диспетчером управління повітряного руху, але ж існує й інша не менш важлива інформація, якою необхідно обмінюватися з екіпажем повітряного судна, який виконує політ. Безумовно, майже будь-яку інформацію можна передати по радіо голосом, але якщо мова йде про об'ємної інформації, у екіпажа просто може не бути на це часу, крім того, якби всі повідомлення передавалися голосом, в районах з високою інтенсивністю повітряного руху елементарно не вистачило б частот в авіаційному діапазоні. Ще одним серйозним недоліком голосової радіозв'язку є дуже висока ймовірність помилки при прийомі інформації, по-перше, радіозв'язок схильний до різного роду перешкод, що погіршує сприйняття, а по-друге - горезвісний людський фактор: люди помиляються і пілоти не виняток, почувши одну цифру, людина може записати іншу, а якщо взяти до уваги те, що в більшості випадків зв'язок ведеться англійською мовою, ймовірність помилок ще більше зростає. Все це вкрай негативно впливає на безпеку польотів. Для усунення приведених обмежень передбачено використання авіаційних автоматизованих систем передачі даних. Однією з реалізацій автоматизованої системи передачі даних є система передачі даних ACARS (Адресно-звітна система авіаційного зв'язку).

Зв'язок диспетчерів з повітряним судном в зоні прямої видимості в ДВЧ діапазоні здійснюється за допомогою передачі мови і даних з використанням різних режимів і протоколів доступу до каналу зв'язку (режимів ACARS, VDL-2, VDL-3, VDL-4). Система ACARS дозволяє здійснювати обмін повідомленнями між повітряним судном і наземною станцією в закодованому вигляді, а для користувача ці повідомлення представлені в текстовому вигляді. ACARS розшифровується як Aircraft Communications Addressing and Reporting System (Адресно-звітна система авіаційного зв'язку) [1].

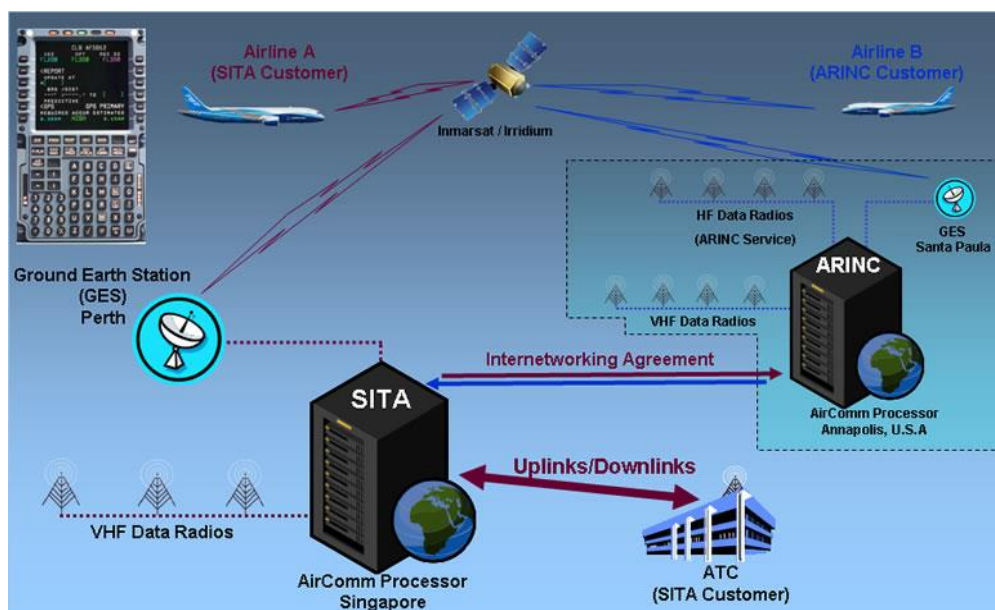


Рис.1.1. Структурна схема системи ACARS

Застосування технології ACARS сьогодні досить широко:

- зв'язок між операційним відділом авіакомпанії і екіпажем: на борт може передаватися план польоту, центральні документи, списки пасажирів і будь-яка інша інформація, що стосується виконання рейсу. З борту може віддаватися будь-яка інформація і запити, наприклад екіпаж може заздалегідь запросити інформацію про виходи на посадку для трансферних пасажирів або повідомити в авіакомпанію про несправності повітряного судна.

- автоматизовані повідомлення для авіакомпанії: в залежності від настройки бортового обладнання, літак буде відправляти повідомлення певного змісту з якоюсь періодичністю або при певному події. Наприклад, повідомлення про зліт або посадку або повідомлення з поточними координатами повітряного судна і залишком палива. Дуже важливими для авіакомпанії є автоматичні повідомлення про виникаючі на борту несправності, це дозволяє заздалегідь організувати необхідне технічне обслуговування і навіть замовити запчастини, як підсумок, істотно скорочується час простою літака на землі.

- отримання метеорологічних зведень погоди і так званий сервіс D-ATIS[1].

Мабуть, одна з найважливіших функцій ACARS серед пілотів, якщо раніше погоду було необхідно прослухати на певній частоті при прибутті в аеропорт

призначення, то тепер її можна отримати і роздрукувати на принтері в кабіні натисканням декількох клавіш незалежно від відстані до аеродрому призначення, правда, варто сказати, що даний сервіс працює далеко не у всіх аеропортах.

-зв'язок між диспетчером управління повітряним рухом і пілотом. Йдеться про CPDLC або Controller-Pilot Data-Link Communication. Технологія працює по каналам ACARS. Якщо коротко, це технологія обміну повідомленнями між диспетчерським пунктом і екіпажем без застосування голосового зв'язку.

## 1.2. Принцип роботи ACARS

З пульту керування одна з робочих радіостанцій в кабіні встановлюється в режим DATA, тобто прийом-передача даних, при цьому пілоту не потрібно встановлювати частоту, всі частоти ACARS заздалегідь запрограмовані і автоматично вибираються в залежності від регіону польоту. Пілот на пульті FMS набирає повідомлення та адресу одержувача. Далі кодер перетворює повідомлення в тональний вид і за допомогою звичайної бортової радіостанції ДВЧ або ВЧ діапазону передає його на наземну аналогічну радіостанцію наземної мережі передачі даних SITA, де це повідомлення розкодовується і передається одержувачу.



```
FLIGHT /08 JFK -PUJ
PDC
AAL1781 XPNDR 1657
B752/W P1300 350

KJFK SHIPP LINND BETNY
KUPEC A554 FLORI***MDPC
@ICAO FLORI/N0462F370 N***

KENNEDY 9 DEPARTURE
CANARSIE CLIMB
MAINT 5000 EXP REQSTD ALT 10MIN AFT DEP
DEPARTURE FREQUENCY 135.9
CONTACT GROUND CONTROL 121.9
ADVISE ON INITIAL CONTACT YOU HAVE ATIS
END
```

Рис.1.2. Бортовий пульт керування ACARS

Аналогічно повідомлення передаються з землі через мережу користувачів SITA на борт, за бажанням відправника вони можуть автоматично друкуватися на принтері в кабіні або виводитися на дисплей.

Повідомлення передаються з землі на борт називають UPLINK, а з борту на землю DOWNLINK.

Інформація в системі ACARS може передаватись по одному із трьох каналів:

4. Радіоканал діапазону дуже високих частот(ДВЧ). Для цього використовуються штатні бортові та наземні радіостанції ДВЧ системи керування повітряним рухом. Для передачі даних виділяються окремі частоти. 131.550 MHz – це частота каналу ACARS по всьому світу.

Також використовуються частоти 131.725, 131.525, 131.825, 136.900 и 136.925 МГц.

При цьому дальність зв'язку і, відповідно, передачі даних при висоті польоту 10 км становить 300.....350 км, що значно обмежує можливості системи[2].

5. Над океанічними районами та районами не забезпеченими мережею авіаційного ДВЧ радіозв'язку передача даних проводиться по каналу радіозв'язку діапазону високих частот(ВЧ). При цьому забезпечується велика дальність зв'язку(порядка 3000....3500 км), але якість передавання даних досить низка. Швидкість передачі також мала.

6. Крім передачі даних по каналах ДВЧ та ВЧ радіозв'язку на наземні радіостанції, може застосовуватися супутниковий канал передачі даних.

Структура супутникового сегменту має вигляд.

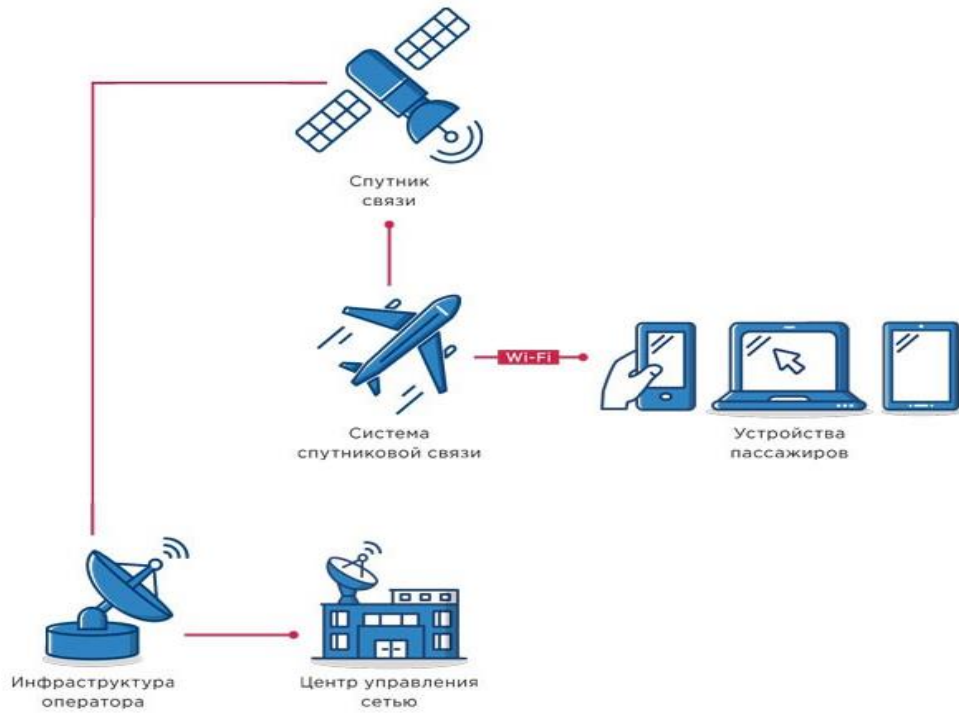


Рис.1.3. Структурна схема супутникового сегменту ACARS

### 1.3 Зона покриття

Відразу слід обмовитися, що ACARS це комерційний сервіс, тобто користуються тільки ті авіакомпанії, які мають договір з одним з провайдерів відповідних послуг. Сьогодні таких провайдерів в світі два: ARINC і SITA, у кожного своя мережа наземних радіостанцій і своє призначене для користувача програмне забезпечення. Мережа ARINC спочатку розгорталася в США, в той час як SITA - європейська компанія і орієнтувалася на європейських користувачів, незважаючи на те, що зона покриття у обох компаній як в Європі, так і в США приблизно однакова, традиційний поділ ринку зберігається і сьогодні. Більш багаті перевізники мають договір і з SITA, і з ARINC[3,4].

Оскільки дальність дії ДВЧ зв'язку обмежена лінією прямої видимості, то радіус дії однієї станції становить близько 300-350 кілометрів для висоти польоту 8000-10000 метрів. Виходячи з цього, розраховується зона покриття. На сьогоднішній день покриття над землею поверхнею має вигляд





Рис.1.4. Зона покриття ACARS

Що ж стосується супутникових каналів передачі даних, для забезпечення потреб ACARS використовуються комерційні супутникові системи зв'язку, наприклад INMARSAT. Очевидно, що в разі використання даної технології зона покриття стає глобальною, однак на сьогоднішньому етапі розвитку супутниковий зв'язок вкрай дорогий, що не дозволяє відмовитися від традиційних каналів передачі даних через радіостанції діапазону коротких хвиль, адже одне повідомлення обходиться в 4-5 разів дешевше, ніж передане по супутникових каналах. В даний час більшість повітряних суден оснащено обладнанням системи ACARS, однак ряд країн вже почали поетапний перехід до використання більш сучасних методів передачі даних. Такими є режими передачі даних в ДВЧ-діапазоні є VDL-2 і VDL-4[5].

Користування системою ACARS вимагає досить великих затрат, тому нею обладнано досить невелика кількість повітряних суден, в основному магістральних ПС. Значну економію коштів принесе модернізація каналів радіозв'язку, особливо ВЧ каналу.

ВЧ канал забезпечить економію коштів за рахунок зменшення витрат на використання супутникових каналів передачі даних[5].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Приведений аналіз об'єкту дослідження показав, що система передачі даних ACARS виконує функції, що в значній мірі забезпечують безпеку польотів, а саме:

- передача інформації про ненормальні польотні умов;
- докладний звіт про роботу двигунів та інших систем(контроль порядку 400 параметрів);
- передача плану обслуговування і ремонту;
- забезпечує автоматичний та ручний обмін повідомленнями типу e-mail між пілотами і диспетчерами;
- передача звітів про погодні умови.

2. Для передачі інформації використовується ряд радіоканалів, кожний з яких має недоліки, що потребують усунення.

3. Перспективним напрямком є модернізація ВЧ каналу передачі даних.

## РОЗДІЛ 2

### ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО ВЧ РАДІОКАНАЛУ

#### 2.1. Методи передачі даних на далекі і наддалекі відстані

На сьогоднішній день тільки системи супутникової і ВЧ радіозв'язку дозволяють передавати дані і голосові повідомлення на відстані до декількох тисяч кілометрів, що надає унікальну можливість охоплення значних територій, в тому числі з гірським рельєфом, а це абсолютно неможливо для традиційних рішень в діапазонах дуже високих та надвисоких частот.

Широке поширення супутникових систем зв'язку(ССЗ) багато в чому обумовлено їх такими властивостями [4]:

1. Забезпечення області обслуговування значних розмірів, аж до глобальної, повністю охоплює поверхню Землі.
2. Можливість обслуговування віддалених, малонаселених і важкодоступних територій, де розгортання наземних мереж зв'язку економічно невиправдано, або просто неможливо.
3. Простота забезпечення широкомовного і багатоадресного режимів передачі.
4. Можливість гнучкого підтримки різних інформаційних послуг і додатків, незалежність технології передачі і комутації від технології надання послуг.
5. Забезпечення спільної передачі по загальним фізичним каналам істотно різнорідних інформаційних потоків (мова, аудіо-, відео-, факс, цифрові масиви і т. д.), показники якості передачі яких істотно відрізняються.
6. Спільна передача безперервного і пакетного трафіку.
7. Надання послуг рухомим користувачам.
8. Висока пропускна здатність супутникових каналів зв'язку при прийнятній високій якості передачі.



9. Простота забезпечення необхідних топологічних властивостей мережі, в тому числі повнозв'язну.

10. Ефективне використання мережевих ресурсів, завдяки можливості перерозподілу пропускну здатності мережі між каналами зв'язку у відповідності з поточними характеристиками мережевого трафіку.

11. Можливість надання користувачам послуги глобального визначення місцезнаходження, а також визначення точного часу.

12. Більша гнучкість супутникових мереж зв'язку (ССЗ), що дозволяє в разі потреби досить просто змінювати область обслуговування шляхом зміни орбіти ретрансляторів, адаптуватися до потреб користувачів, змінюючи перелік надаваних інформаційних послуг.

13. Відносно малі терміни розгортання ССЗ і налагодження обладнання та апаратури.

14. Незалежність вартості передачі сигналів через супутник від відстані між земною станцією, що передає сигнал, і станцією, його приймаючої.

15. Мала ймовірність бітової помилки при передачі даних.

Однак, як і будь-яка інша система має і ряд недоліків. До них належать такі:

1. Значна затримка поширення, характерна для ССЗ, використовують ретранслятори на геостаціонарних орбітах, що досягає 500 мс, особливо відчутна при телефонному з'єднанні, що робить неефективним використання ССЗ при адаптованою до неї передачі даних.

2. Мале відношення сигнал / перешкода, викликане просторовим розсіюванням енергії радіохвилі на трасі "Земля - супутник - Земля" і, як наслідок, низька завадозахищеність. Для того щоб в цих умовах забезпечити прийнятну вірогідність помилки сигналу, доводиться використовувати великогабаритні антени, малошумні елементи та складні перешкодостійкі коди.

3. Поглинання в тропосфері. Поглинання сигналу атмосферою знаходиться в залежності від його частоти. Крім поглинання, при поширенні радіохвиль в атмосфері присутній ефект завмирання,

причиною якого є різниця в коефіцієнтах заломлення різних шарів атмосфери.

4. Іоносферні ефекти. Ефекти в іоносфері обумовлені флуктуаціями розподілу вільних електронів. До іоносферних ефектів, що впливає на поширення радіохвиль, відносять поглинання, затримку поширення, зміна частоти, обертання площини поляризації.

5. Вплив сонячної інтерференції. При наближенні Сонця до осі супутник - наземна станція радіосигнал, який приймає з супутника наземною станцією, пропадає, тому що значно збільшується рівень шумів,

прийнятих від Сонця.

6. Велика вартість надання послуг зв'язку [3].

7. Залежність від чинників світової та політичної обстановки, пов'язана з тим, що більшість супутників належить приватним іноземним компаніям.

Незважаючи на величезні досягнення в області супутникових систем радіозв'язку, розвиток стільникових мереж зв'язку і систем широкосмугового бездротового доступу, високочастотний радіозв'язок в даний час продовжує відігравати важливу роль при передачі інформації на далекі і наддалекі відстані цивільними відомствами, так авіаційними структурами [3 , 4]. В авіаційному радіозв'язку особливе місце як і раніше відведено ВЧ радіозв'язку як одного з базових видів резервного зв'язку. Високочастотний радіодіапазон широко використовується цивільними, військовими, державними і приватними користувачами завдяки тому, що системи ВЧ радіозв'язку мають ряд переваг: велика дальність радіозв'язку, швидкість розгортання і відсутність необхідності створення мережевої інфраструктури, гнучкість даних систем. ВЧ радіо дозволяє передавати голос, електронні та текстові повідомлення, що робить дане середовище вкрай привабливою для задач бездротового зв'язку, причому як для легального, так і для нелегального використання. Дальність радіозв'язку в ВЧ діапазоні досягається за рахунок того, що радіозасоби приймають не тільки прямі хвилі на лінії прямої видимості, але і відбиті від Землі і іоносфери. Земні хвилі дозволяють здійснювати радіозв'язок на відстані близько 100 км над поверхнею землі і близько 300 км над поверхнею моря. Вони відрізняються відносною стабільністю, при цьому дальність радіозв'язку залежить від частоти і потужності

передавача, а також земної провідності, який зумовлюється районом місцевості. Просторові хвилі забезпечують набагато більшу зону покриття, що і становить найбільший інтерес для користувачів, дозволяючи здійснювати радіозв'язок на відстанях декількох тисяч кілометрів. Дана особливість корисна як для завдання забезпечення зв'язку, так і для цілей радіоперехоплення. Однак, властивості іоносфери, а значить, і дальність радіозв'язку можуть змінюватися протягом дня, будуть залежати від сезону року і змінюватися з року в рік. Сонячна активність також впливає на характеристики іоносфери, що значно ускладнює завдання прогнозу поширення радіохвиль ВЧ діапазону. ВЧ радіозв'язок організовується без необхідності створення операторської інфраструктури. Для створення радіомережі необхідна наявність одного радіопередавача для кожної станції, що працює через єдину антену. Така можливість ідеальна для роботи у віддалених районах, які не мають інфраструктури захищеного зв'язку. Для забезпечення конфіденційності переговорів в даному режимі в радіозв'язку застосовуються спеціальні форми сигналів і технології програмно перебудовується радіочастоти. Слід зазначити одночасно зрослий інтерес різних відомств до ВЧ-радіозв'язку з рухомими об'єктами, обумовлений такими факторами, як[3]:

1. Простота використання. Поява адаптивних способів організації зв'язку, що дозволяють вибирати оптимальну за якістю частоту зі списку можливих, а також швидкість передачі даних, привели до зменшення ролі оператора в процесі організації і підтримки зв'язку.

2. Незалежність від факторів світової економічної і політичної обстановки.

3. Дешевизна і доступність апаратури.

4. Поява нових технологій обробки інформації, що дозволили значно підвищити надійність зв'язку, і швидкий розвиток цифрових технологій, що дозволили істотно підвищити можливості ВЧ радіозв'язку. Так, якщо раніше якість зв'язку безпосередньо залежало від досвіду і майстерності оператора, то зараз воно забезпечується програмно - апаратними засобами апаратури зв'язку [5].

5. Можливість забезпечення зв'язку через протяжні важкодоступні простори, наприклад, водні, гірські, лісові райони, особливо характерні для авіаційних трас.

6. Засоби ВЧ радіозв'язку мають простоту розгортання і відновлення в разі порушення в результаті дії перешкод і низькою вартістю одного каналу на кілометр дальності зв'язку. [6, 7]

Ключовими недоліками ВЧ радіозв'язку є[3]:

1. Залежність від стану іоносфери Землі.
2. Обмеженість швидкості передачі інформації, обумовленої частотним і часовим розсіюванням, які спостерігаються в каналі зв'язку.
3. Низька швидкість передачі даних в полярних областях, викликана великим загасанням і гіршими умовами поширення сигналу.
4. Наявність в каналі зв'язку великої кількості перешкод від сторонніх радіостанцій.
5. Завмирання сигналу, що виникають внаслідок багатопроменевого розповсюдження сигналів (рис.2.1).

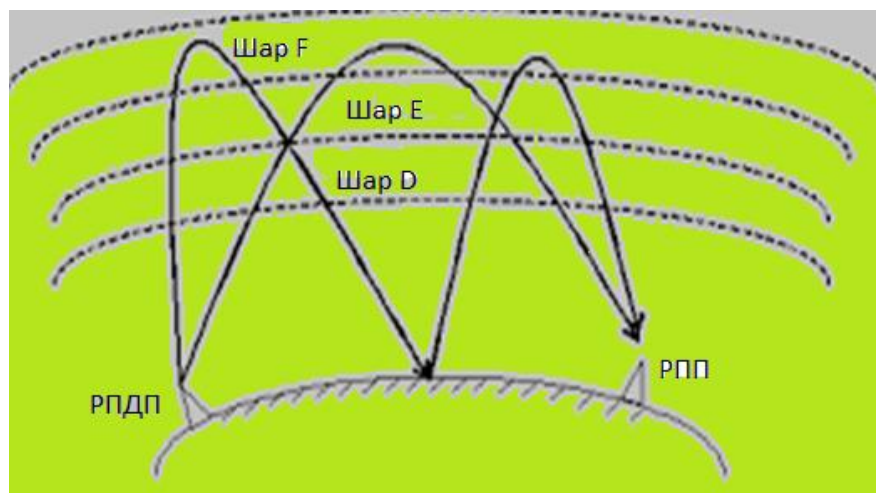


Рис.2.1. Реалізація багатопроменевого розповсюдження ВЧ сигналу

Останніми роками системи високочастотного зв'язку зазнають значних змін. У відомствах створюються єдині інформаційно - телекомунікаційні системи, при цьому змінюється і роль ВЧ радіозв'язку. Діючі системи ВЧ радіозв'язку силових відомств характеризуються істотним відставанням від сучасного рівня науки і техніки. Поточна обстановка в силових структурах така, що потрібні стабільні, надійні, мають високу ступінь кодування канали зв'язку, передача інформації за якими можлива в автоматичному режимі з мінімальним залученням

обслуговуючого персоналу. У зв'язку з цим необхідним є впровадження високоінтелектуального обладнання з розвиненими функціями самодіагностики, інтуїтивно зрозумілими інтерфейсами, гнучкістю обслуговування. Для реалізації таких засобів зв'язку розробникам потрібно більш широке використання сучасної елементної бази та цифрової мікропроцесорної техніки.

1. Підвищення завадостійкості, надійності і швидкості передачі даних за рахунок впровадження передових алгоритмів цифрової обробки сигналів.

2. Розробка засобів тестування розробленої апаратури зв'язку, в тому числі імітаторів різних умов поширення сигналів, спостережуваних в ВЧ каналах зв'язку.

3. Використання апаратури зондування іоносфери.

4. Створення адаптивних радіоліній з автовибором робочої частоти і швидкості передачі даних.

5. Збільшити швидкість передачі повідомлень.

6. Забезпечити можливість організації зв'язку з об'єктами, що рухаються з великою швидкістю.

7. Підвищити скритність передачі повідомлень.

8. Сигнал повинен забезпечувати передачу всього спектру інформаційного сигналу (для мови 300-3400 Гц).

9. Повинен володіти мінімальним пікфактором для ефективного використання потужності передавача.

## **2.2. Способи підвищення ефективності радіозв'язку в діапазоні коротких хвиль**

### ***2.2.1. Рознесений прийом***

Основна боротьба в каналах ВЧ радіозв'язку проходила з завмиранням сигналу. Сильні завмирання сигналу в каналі ускладнюють оцінку переданих повідомлень і призводять до погіршення якості передачі інформації. Традиційним методом підвищення завадостійкості таких систем є рознесення. У колишні роки сфера застосування рознесеного прийому обмежувалася короткохвильовим радіозв'язком, де

використовувалися добре апробовані методи і техніка. Ідея рознесеного прийому була реалізована ще в 1927 р для організації радіотелефонного короткохвильового зв'язку. У 1931 р рознесений прийом почав застосовуватися в радіотелеграфному зв'язку.

Останнім часом у зв'язку з широким впровадженням систем стільникового та мобільного супутникового радіозв'язку треба було повернутися до цієї проблематики. Хоча загальна ідеологія рознесеного прийому залишилася колишньою, змінилися як характеристики каналів (перехід в нові діапазони частот, прийом сигналів в більш складних умовах перевідбиттів, наявність великої кількості сигналів, що заважають і т.д.), так і методи передачі сигналів по радіоканалах. Не менш важливим є і те, що з'явилася можливість реалізації більш ефективних, але і більш складних методів рознесення. Ідея використання рознесення для боротьби з замираннями полягає в спільному використанні на прийомі декількох сигналів, що несуть одну і ту ж інформацію, але прийшли різними шляхами. Рознесення має обиратись у такий спосіб, щоб ймовірність одночасних замирань всіх використовуваних сигналів була набагато меншою, ніж будь-якого одного з них. Іншими словами, ефективність рознесення тим вище, чим менше кореліровані замирання в парціальних каналах. Класичний підхід до реалізації методу рознесення полягає у використанні одного передавача і декількох, рознесених в просторі прийомних антен з подальшим ваговим підсумовуванням або автовибором сигналів з метою підвищення якості прийому(рис.2.2.) [5].

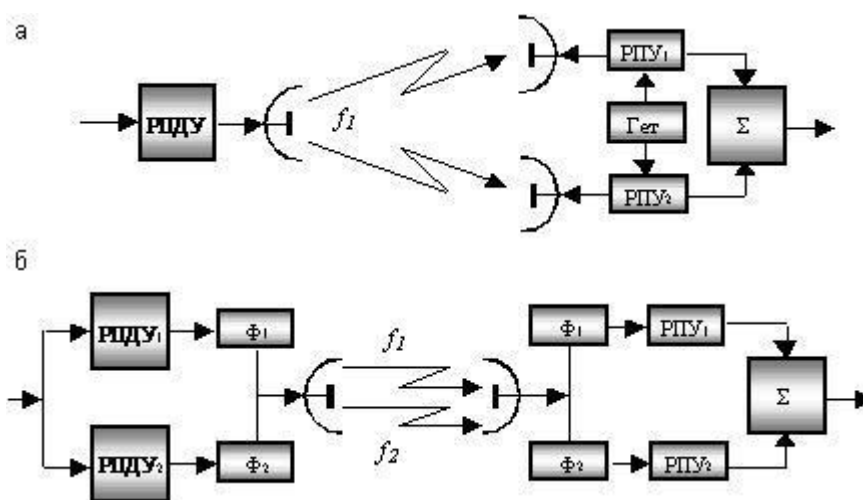


Рис.2.2 Принцип організації рознесеного прийому

Для систем авіаційного повітряного радіозв'язку така реалізація неприйнятна, оскільки використання декількох приймальних антен і пристрої комбінування сигналів робить систему громіздкою і дорогою. Реалізація такої системи на борту ПС взагалі неможлива.

Однак, можлива організація рознесених каналів за рахунок використання декількох рознесених антен на передачу в системах мобільного зв'язку (на базовій станції). Базова станція обслуговує сотні і тисячі мобільних абонентів і доцільніше ускладнення апаратури невеликого числа базових станцій, ніж безлічі мобільних терміналів. При цьому на ділянці «мобільний абонент - базова станція» може здійснюватися прийом на ті ж рознесені антени базової станції, але працюють в режимі прийому. У деяких існуючих стільникових системах вже використовуються на базових станціях дві прийомні антени для рознесеного прийому. Ці ж антени можуть бути використані для рознесеної передачі.

Таким чином, приведений метод підвищення якості передачі даних в системі ACARS не може бути використаний.

### ***2.2.2. Використання набору робочих частот***

Для кожної радіолінії складається частотний розклад на частоти, які слід використовувати для цілодобового радіозв'язку. Системи зв'язку даного діапазону змінюють робочі частоти при роботі вдень і вночі [10]. Радіозв'язок днем здійснюється на більш коротких "денних" хвилях в діапазоні 12 ... 30 МГц (10 ... 25 м), а вночі використовують так звані "нічні" хвилі від 35 до 100 м (8,6 ... 3 МГц).

Такий підхід можна реалізувати на трасах з відомими термінами прольоту. При цьому необхідно відслідковувати зміну часових поясів, координат та часу доби, що додасть екіпажу значних додаткових операцій [6].

Для вирішення проблеми необхідно використовувати сучасні технології організації передачі інформації в умовах багатопроменевого розповсюдження.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. В умовах відсутності наземної інфраструктури системи ACARS можливе використання інших систем передачі інформації, таких як супутникові системи та системи радіозв'язку високочастотного діапазону.

2. В умовах високої вартості використання супутникових систем радіозв'язку важливе значення має використання систем високочастотного радіозв'язку, що забезпечить при низькій вартості зв'язок на значні відстані влюбій точці знаходження повітряного судна..

3. Але реалізація високочастотного радіозв'язку ускладнюється особливостями розповсюдження радіохвиль ВЧ діапазону, які характеризуються багатопроменевим розповсюдженням. Багатопроменеве розповсюдження приводить до завмирання сигналів в точці прийому, нестабільності радіозв'язку або до пропадання сигналу.

4. Існуючі методи боротьби з багатопроменевим розповсюдженням неможливо використовувати в системах авіаційного повітряного радіозв'язку, зокрема в системі передачі даних ACARS.



## РОЗДІЛ 3

### СИСТЕМИ З МОДУЛЯЦІЄЮ OFDM

#### **3.1. Принцип роботи системи з ортогональним частотним мультиплексуванням каналів**

При високих швидкостях передачі застосовується метод передачі даних, який полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по безлічі частотних піднесучих і передача ведеться паралельно на всіх цих підканалах. При цьому висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх каналах, а швидкість передачі в окремому підканалі цілком може бути невисокою. Оскільки в кожному з частотних підканалів швидкість передачі можна зробити не надто високою, це створює передумови для ефективного придушення меж символної інтерференції. При частотному поділі каналів необхідно, щоб ширина окремого каналу була, з одного боку, досить вузькою для мінімізації спотворення сигналу в межах окремого каналу, а з іншого - достатньо широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того, для економного використання всієї смуги каналу, яке поділяється на підканали, бажано якомога щільніше розташувати частотні підканали, але при цьому уникнути міжканальної інтерференції, щоб забезпечити повну незалежність каналів один від одного. Частотні канали, що задовольняють перерахованим вимогам, називаються ортогональними. Несучі сигнали всіх частотних підканалів (а точніше, функції, що описують ці сигнали) ортогональні один одному. Важливо, що хоча самі частотні підканали можуть частково перекривати один одного, ортогональність несучих сигналів гарантує незалежність їх один від одного, а отже, і відсутність міжканальної інтерференції. Розглянутий спосіб розподілу широкосмугового каналу на ортогональні частотні підканали називається ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM). Сигнал в системі з ортогональним частотним мультиплексуванням має розбиття на безліч несучих, що забезпечує невелику кількість символів на одну несучу і знижує

міжсимвольну інтерференцію. Додатково застосовується захисний інтервал - циклічний префікс, що додається в початок кожного символу. Для ефективної роботи системи, що використовує такий підхід, максимальна затримка в каналі не повинна перевищувати довжину циклічного префікса. Висока ефективність систем OFDM при роботі в каналах з багатопроменевим розповсюдженням радіосигналу робить їх придатними для високошвидкісних систем передачі даних в наземних системах зв'язку [7,12].

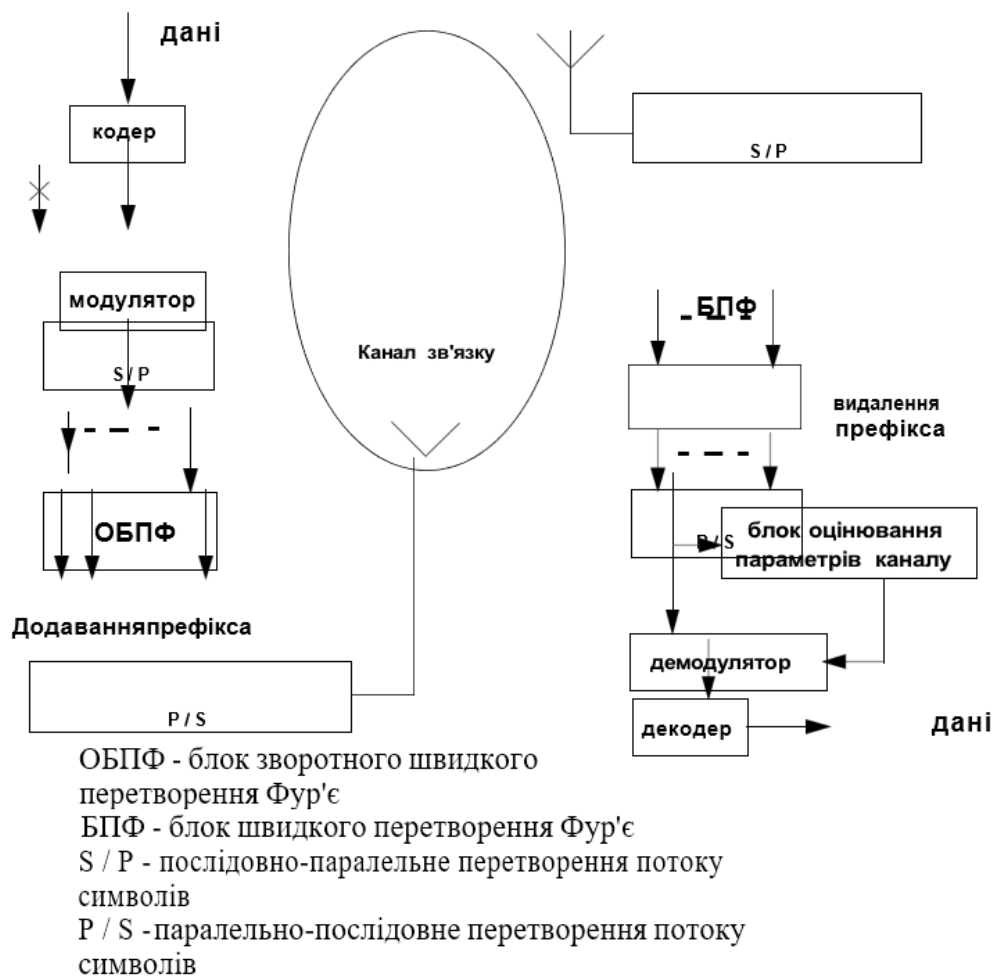


Рис. 3.1. Структура системи зв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням

Дані користувача спочатку надходять в блок завадостійкого кодування, а потім на модулятор. Після модуляції дані у вигляді комплексних символів надходять в блок Зворотного швидкого перетворення Фур'є (ОБПФ), де відбувається формування сигналу OFDM з використанням  $M$  піднесуть. Символ OFDM складається з основної інформаційної частини і циклічного префікса, який

формується шляхом копіювання останніх  $L$  відліків в початок кадру. Далі послідовність символів OFDM перетворюється в аналоговий сигнал і віддається по каналу зв'язку. Тривалість циклічного префікса вибирається таким чином, щоб бути більше, ніж тривалість імпульсного відгуку каналу зв'язку. Таким чином, символ OFDM має тривалість  $(M + L) T_0$ , де  $T_0$  - період дискретизації в системі.

дані кодер  $S / P$  Канал зв'язку видалення модулятор БПФ префікса  $P / S$   $S / P$  блок оцінювання параметрів каналу ОБПФ Додавання префікса демодулятор  $P / S$  декодер дані ОБПФ - блок зворотного швидкого перетворення Фур'є БПФ - блок швидкого перетворення Фур'є  $S / P$  - послідовно-паралельне перетворення потоку символів  $P / S$  - паралельно-послідовне перетворення потоку символів

На приймальній стороні, сигнал після дискретизації і видалення префікса надходить в блок Швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), де здійснюється демодуляцію сигналу OFDM. Після перетворення паралельного потоку символів в послідовний, символи надходять в демодулятор, а також в блок оцінювання параметрів каналу. Оцінки параметрів каналу необхідні для роботи демодулятора, тому вихід блоку оцінювання параметрів каналу з'єднаний з демодулятором. Подальші перетворення сигналу залежать від структури конкретної системи і не відносяться до основної концепції OFDM. У реальних умовах роботи систем бездротового рухомого зв'язку з OFDM доводиться працювати в умовах, коли в каналі зв'язку сигнал піддається впливу завмирань. Тому для отримання прийнятною завадостійкості потрібне використання завадостійкого кодування.

Будь-які модеми забезпечують перенесення сигналу на фізичний рівень, роблячи його пристосованим для поширення в каналі зв'язку. модеми,

реалізовані за технологією OFDM, як відомо [13, 14], мають найбільшу спектральної ефективністю і, як наслідок, дозволяють передавати інформаційні дані з великою швидкістю. Тому в залежності від функцій, які повинна виконувати система зв'язку, пропонований модем може бути використаний для наступних цілей:

- передача повідомлень великого обсягу;
- зв'язок з повітряними суднами в умовах великого доплерівського зсуву;

- скорочення часу доставки повідомлень, що вимагають фіксованого часу прийому;
- організація цифровий двостороння з поділом за часом каналу прийому і передачі.

Якщо при використанні OFDM-модему знехтувати його спектральної ефективністю, замінивши групу піднесучих одним інформаційним символом, то стає можливим підвищити надійність зв'язку, істотно зменшивши потужність, що випромінюється передавачем, що робить можливим його застосування для наступних цілей:

- скритна передача повідомлень від кореспондентів;
- високонадійна передача команд управління;
- використання в якості зворотного каналу зв'язку в асиметричному каналі зв'язку з перезапитом;
- передача повідомлень в умовах радіопротидії.

### Структурна схема OFDM- модему

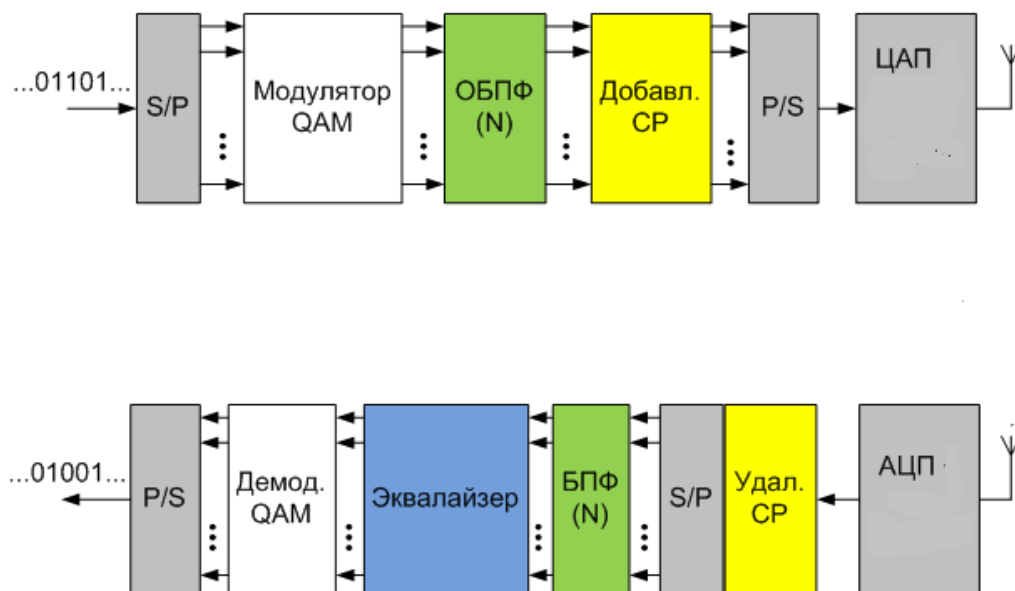


Рис. 3.2. Загальна структурна схема OFDM – модема

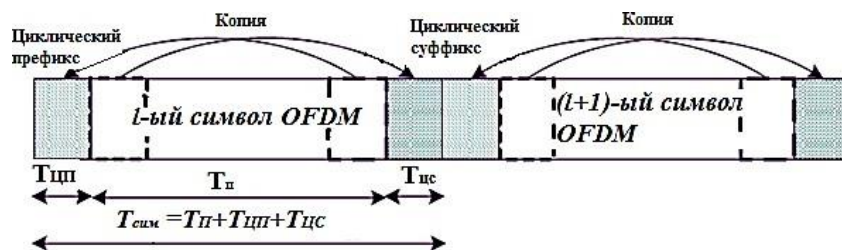
S / P - послідовно-паралельне перетворення потоку символів

P / S - паралельно-послідовне перетворення потоку символів

Базова структура загальної обробки в основній смузі частот передавача OFDM показана на рис.3.2.

На бінарних вхідних даних передавач виконує кодування, виконання квадратурної амплітудної маніпуляції (QAM), N-точкове зворотнє перетворення Фур'є і додає циклічний префікс перш, ніж сигнал передавача буде оброблений вікном, перенесеним в аналогову область цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП), перетворений на радіо частоту в квадратурних каналах і випромінювання.

Формування символів OFDM. Крім тих, що піднесучі, на яких передається інформація, існують службові піднесучі. До таких відносяться захисні інтервали, пілот-сигнали і додаткова службова інформація для синхронізації приймача і передавача, і режимів їх роботи. Пілот-сигнали можуть мати фіксоване положення на піднесучих, або змінне циклічно змінюється від символу до символу OFDM в кадрах [8].



Найчастіше використовують обидва варіанти одночасно. Пілот-сигнали служать для оцінки параметрів каналу і оцінки зсуву в спектрі OFDM-сигналу, вони можуть бути модульовані псевдовипадковою послідовністю або бути чистими тонами, що визначається стандартами для різних систем зв'язку [9].

Також варто відзначити, що в роботах, які досліджують можливості когнітивного радіо, пілот-сигнали служать для ідентифікації передавача і прогнозування його роботи.

Розглянемо вплив захисного інтервалу на позасмугове випромінювання. Для цього розглянемо спектр послідовності двох OFDM-символів без віконної обробки, інформаційні несучі модульовані схемою QAM4. При смузі сигналу 4 МГц розглядалися 1024 піднесучих. На рис. 3.3 показані результати розрахунку модуля спектра комплексної обвідної при різних захисних інтервалах.

З аналізу цього малюнка слід, що чим більше захисні інтервали, тим більше круті схили спектра ми отримуємо, однак це призводить до значного звуження ширини інформаційного спектру сигналу.

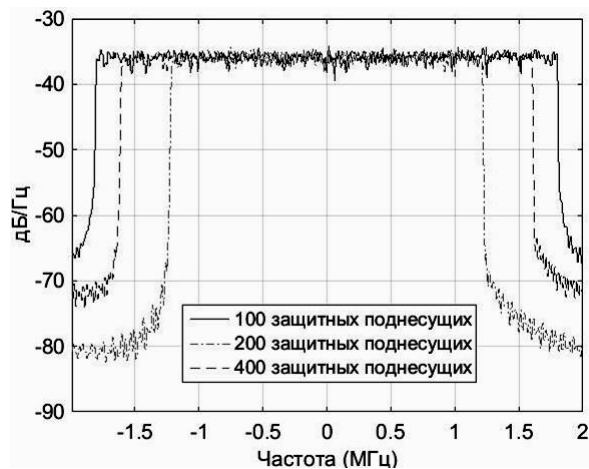


Рис. 3.3. Спектр OFDM символу при різному числі захисних піднесучих

Збереження ортогональності є необхідним для того, щоб приймач міг правильно розпізнати інформацію на під несучих. Для цього необхідно виконати наступні умови:

1. Приймач і передавач повинні бути точно синхронізовані.
2. Аналогові компоненти передавача і приймача, повинні бути дуже високої якості.

### 3.2. Розрахунок параметрів сигналу OFDM

Розрахунок будемо проводити з урахуванням можливостей та обмежень бортових та наземних радіопристроїв, задіяних в мережі ACARS

Для передавання повідомлення використовується бортовий або наземний радіо передавальний пристрій.

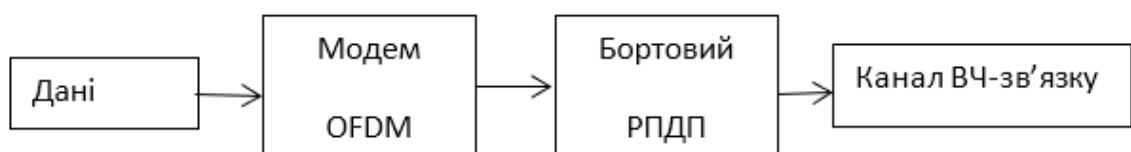


Рис.3.4. Структурна схема передавання повідомлення в ACARS

Сигнал, сформований модемом буде мати спектр, ширина якого рівна смузі пропускання радіоприймального пристрою

Для приймання сигналу від системи ACARS на землі буде використовуватися штатний радіоприймальний пристрій типу Р-160 «Сосна» або аналогічний йому[4].

Критичним значенням характеристик приймача для прийняття радіосигналів є смуга пропускання.

Смуга пропускання радіоприймача Р-160 «Сосна» забезпечується трьома фільтрами, що вмикаються у відповідних режимах роботи( фільтри 5 кГц, 15 кГц, 40 кГц).

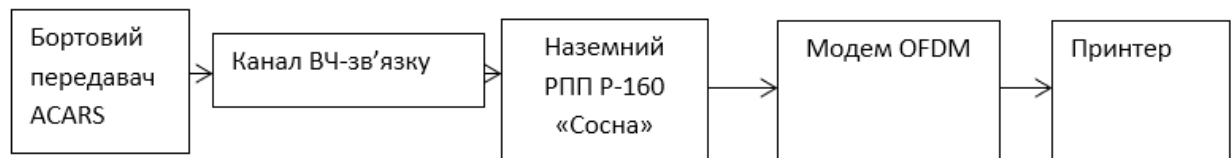


Рис. 3.5. Структурна схема приймання повідомлення в ACARS

Таким чином, приймаємо:

1. Ширина спектру інформаційного сигналу 15 кГц;
2. Швидкість передачі 9600 біт/с

Функціональна блок-схема фізичного рівня передавального і приймального трактів приведена на рис.3.3.

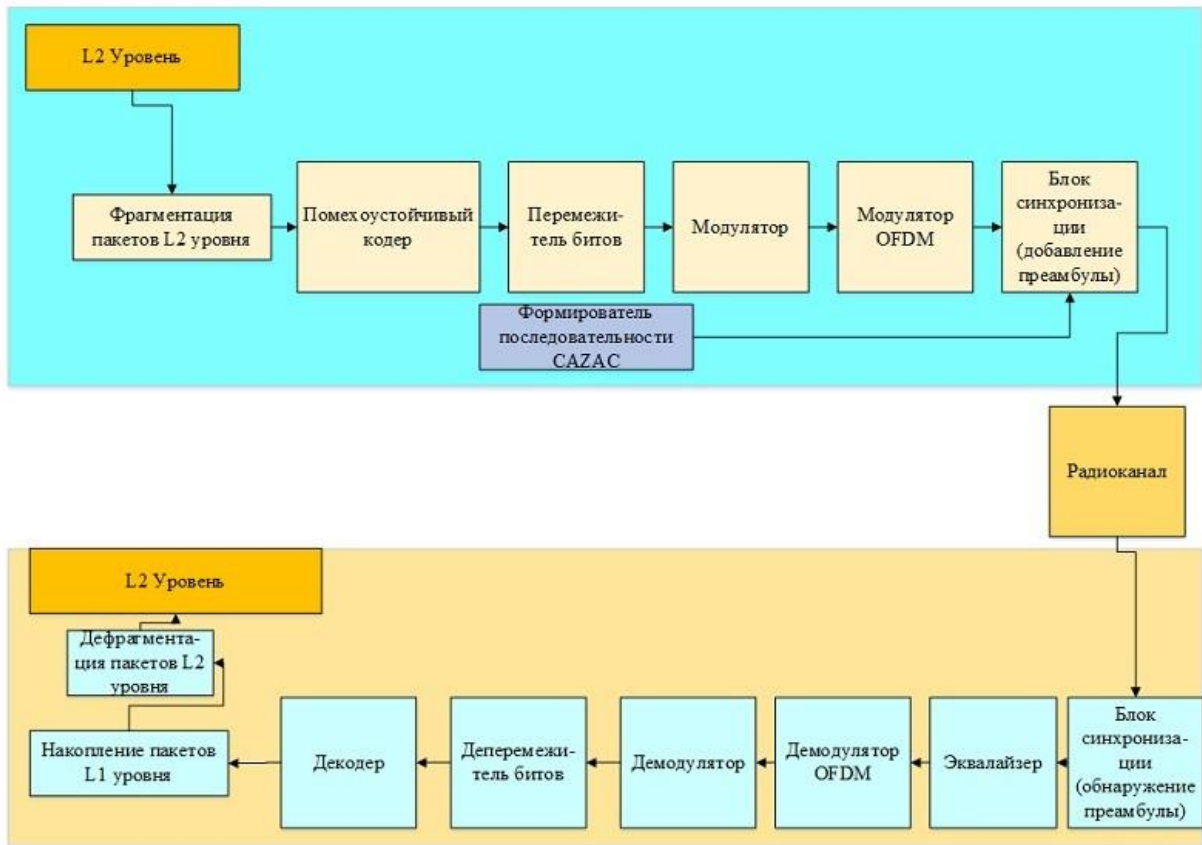


Рис. 3.6. Функціональна блок-схема приймача OFDM – сигналу

Блоки фрагментації і дефрагментації здійснюють розбиття пакетів каналного рівня на частини для подальшої обробки цих блоків на фізичному рівні і, потім, складання прийнятих пакетів для передачі цілого пакета.

Як перешкодостійкого кодера пропонується використовувати блоковий кодер, який використовує алгоритм кодування на основі кодів Боуза-Чоудхурі-хоквінгема (БЧХ) з різними швидкостями кодування для різних профілів:  $\frac{3}{4}$  для виду модуляції QPSK і  $\frac{1}{2}$  для модуляції QAM-16.

Відповідно, блоки модулятора і демодулятора можуть бути трьох видів: BPSK, QPSK і QAM-16. Вид модуляції, а відповідно і тип використовуваного кодера, визначається станом радіоканалу, яке визначається на етапі вирівнювання каналу (блок еквалайзера). Вирівнювання буде здійснюватися за методом найменших квадратів (least square або LS).

Параметри блоків модуляції і демодуляції OFDM будуть розраховані в наступних пунктах проекту. Як інструмент синхронізації передбачається



використовувати преамбулу у вигляді CAZAC-послідовності, параметри якої будуть розраховані в п. 3.4.

В якості вихідних характеристик для розрахунків використовуємо наступні параметри:

- Ширина смуги частот  $\Delta F = 15$  кГц;
- Швидкість передачі  $R = 9600$  біт / с;
- Розширення затримки  $\Delta\tau = 1,5$  мкс.

Введемо захисний часовий інтервал для усунення міжсимвольних спотворень, що викликаються ефектами багатопроменевості при поширенні радіохвиль:

$$\Delta g = 8 * \Delta\tau$$

отримаємо:

$$\Delta g = 8 * 1,5 \text{ мкс} = 12 \text{ мкс}$$

Далі зробимо розрахунок тривалості OFDM символу на підставі формули :

$$T_{\text{симв}} = 32 * \Delta g$$

отримаємо:

$$T_{\text{симв}} = 32 * 12 \text{ мкс} = 384 \text{ мкс}$$

Звідси за формулою отримаємо тривалість інтервалу обробки символу:

$$T = T_{\text{симв}} - \Delta g$$

отримаємо:

$$T = 384 - 12 = 372 \text{ мкс}$$

Відповідно визначимо відстань між частотами сусідніх піднесучих і число піднесучих в смузі частот системи відповідно:

$$\Delta F = 1/T;$$

$$N = \Delta f / \Delta F$$

отримаємо:

$$\Delta F = 1/T = 1/372 = 234,38 \text{ Гц}$$

$$N = \Delta f / \Delta F = 15000 / 234,38 = 64$$

Розрахуємо швидкість проходження OFDM-символів за формулою:

$$R_{\text{симв}} = 1 / T_{\text{симв}}$$

отримаємо:

$$R_{\text{симв}} = 1/ T_{\text{симв}} = 1/384 \text{ мкс} = 0,0026$$

При швидкості передачі 9600 біт / с і швидкості проходження символів 0,0026 МГцсимвол / с кожен OFDM-символ повинен переносити 400 інформаційних бітів.

Так як при обробці сигналу використовується алгоритм ШПФ, потрібно доповнити передається OFDM-символ 2 нульовими отсчетами до 64 відліків. Тоді на інтервал  $T$  припадатиме 64 вибірки, звідси інтервал дискретизації можна знайти за формулою:

$$T_{\text{диск}} = T/64$$

отримаємо:

$$T_{\text{диск}} = 372/64 = 5,8 \text{ мкс}$$

Частота дискретизації визначається через формулу:

$$F_{\text{диск}} = 1/ T_{\text{диск}}$$

отримаємо:

$$F_{\text{диск}} = 1/ T_{\text{диск}} = 1/5,8 = 17241 \text{ Гц}$$

Приймаємо частоту дискретизації 32 кГц.

В рамках проекрованої системи будуть використані три профілі фізичного рівня: модуляція виду BPSK без кодування, модуляція виду QPSK з перешкодостійким кодуванням на швидкості  $3/4$ , модуляція виду QAM-16 з перешкодостійким кодуванням на швидкості  $1/2$ .

Для профілю фізичного рівня з видом модуляції BPSK без кодування кожен каналний символ буде переносити один біт інформації. Тоді один OFDM символ буде містити 120 інформаційних бітів, якщо будуть використовуватися 500 піднесуть, що відповідає максимальній кількості інформаційних піднесуть в системі. Застосування каналного кодування призведе до збільшення кількості необхідних піднесуть, і, відповідно, до розширення смуги частот системи за межі відведеного діапазону в 15 кГц, отже, профіль з видом модуляції BPSK буде використовуватися в системі без застосування каналного кодування.

Для профілю фізичного рівня системи з типом модуляції QPSK пропонується використовувати блоковий канальний кодер на швидкості  $\frac{3}{4}$ . Тоді один канальний символ буде переносити  $2 * (\frac{3}{4}) = 1,5$  біта інформації.

Для профілю, що використовує найменш стійкий до перешкод вид модуляції QAM-16, буде використовуватися канальний кодер на швидкості  $\frac{1}{2}$ . Тоді на кожен канальний символ припадатиме по 2 інформаційних біта.

### **3.3. Апаратурна реалізація OFDM – модему високочастотного діапазону**

Виходячи з аналізу розрахунку параметрів OFDM – модему, для апаратурної реалізації модему пропонується використати модем типу SM2400[16].

SM2400 - це вузькосмуговий модем високочастотного радіозв'язку, який поєднує в собі економічний дизайн, з високим рівнем програмованості для вирішення безлічі схем зв'язку та нових стандартів. Надзвичайно гнучка система на мікросхемі SM2400 має двоядерну архітектуру для виділеної обробки сигналів та функціональність, що гарантує високу продуктивність зв'язку, зберігаючи при цьому дуже високий рівень гнучкості та програмованості для OFDM та інших відкритих стандартів та повністю налаштований до реалізації. Він містить високошвидкісний 256-розрядний процесор AES-CCM для забезпечення стандартної відповідності та безпечного зв'язку.

SM2400 - це високопрограмований модем на основі OFDM для організації систем радіозв'язку. SM2400 поєднує в собі переваги програмованої архітектури з енергоспоживанням та економічною ефективністю, використовуючи ядро DSP, сконфігуроване спеціально для модуляцій OFDM, та виділене 32-бітове ядро, яке запускає протоколи. Завдяки своєму високому рівню програмованості, SM2400 забезпечує безліч комунікаційних схем і може задовольнити відповідні специфічні схеми зв'язку та нові стандарти.

SM2400 постачається з набором опцій прошивки, що реалізують рівні, сумісні з IEEE 1901.2, рівень зв'язку LoWPAN, а також PRIME, G3-PLC та інші спеціальні режими, розроблені для промислових програм IoT.

Запатентовані режими (XXR та XR) забезпечують надійну комунікацію в суворих умовах для застосувань, де відповідність стандартам не потрібна. SM2400 може досягти швидкості передачі даних до 500 кбіт/с в діапазоні частот 500 кГц ..50 МГц.

SM2400 забезпечує безпечний зв'язок, підтримуючи 256-бітове ядро шифрування AES з підтримкою режиму CCM. Вбудований аналоговий інтерфейс із АЦП, ЦАП, регулюванням підсилення та двома підсилювачами забезпечує дуже ефективну конструкцію системи із низькою вартістю специфікації.

SM2400 пропонує наступні переваги[17]:

- Однокристальний інтегруючий фізичний рівень (PHY) та контролер доступу до медіа (MAC)
- Велика кількість режимів роботи, що відповідають всім загальноприйнятим стандартам OFDM.
- Надзвичайно надійні власні режими зв'язку, оптимізовані для ліній з великим рівнем завад.
- Висока гнучкість для вирішення стандартних питань, нових стандартів та спеціальних патентованих режимів.
- Типові програми для пристрою SM2400 включають:
  - Інтелектуальна мережева комунікація
  - Розширена інфраструктура вимірювання (AMI)
  - Автоматичне зчитування лічильника (AMR)
  - Управління вуличним освітленням та розумні баласты
  - Управління сонячною енергією та альтернативною енергією
  - Розумний моніторинг енергії будинку
  - Автоматизація фабрик та будівель (BA)

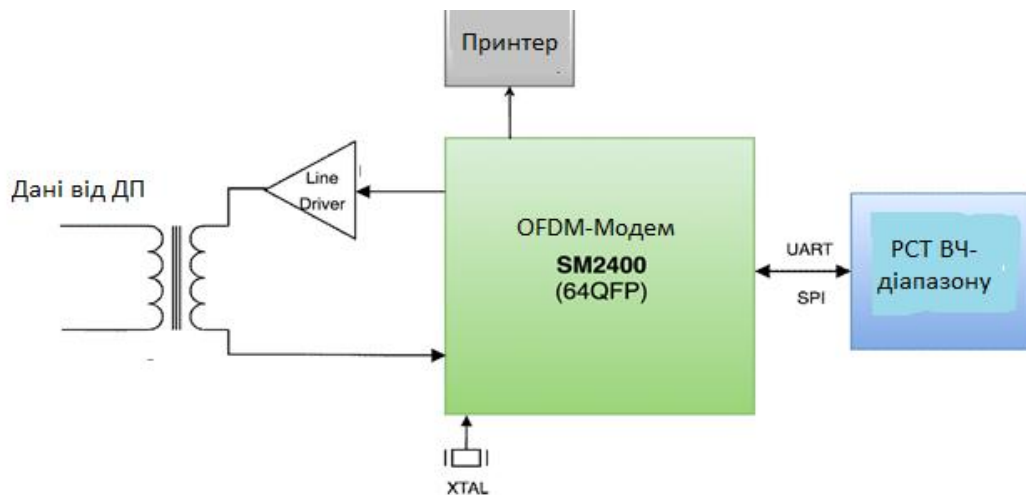


Рис.3.7. Принцип підключення модема SM2400

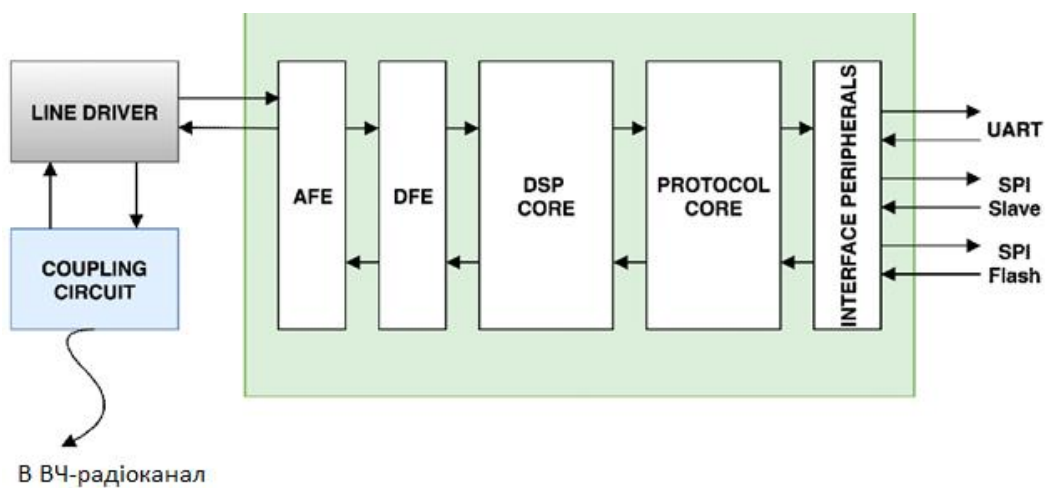


Рис.3.8. Блок-схема SM2400



Рис.3.9. Зовнішній вигляд модему SM2400

## Аналоговий інтерфейс модему

SM2400 інтегрує аналоговий інтерфейс (AFE), оптимізований для зв'язку N-PLC. AFE включає АЦП, ЦАП, PGA та два OpAmp для досягнення найкращої потужності сигналу з мінімальною зовнішньою специфікацією. Зовнішні компоненти включають схему з'єднання та лінійний драйвер високої напруги, які можуть змінюватися для різних застосувань та для різних діапазонів дії.

Щоб забезпечити найбільш економічну конструкцію системи, SM2400 включає внутрішній регулятор напруги. Для досягнення найкращої енергоефективності рекомендується регулювання зовнішнього живлення.

### LDO регулятор напруги

Регулятор напруги LDO, інтегрований в SM2400 AFE, видає напругу 1,8 В від джерела живлення 3,3 В. Він може управляти максимальним струмом навантаження 250 мА. Для виходу потрібен зовнішній роз'єднувальний конденсатор, щоб зробити регулятор стабільним. Сигнал відключення живлення "LDO\_PD" (контакт 56) використовується для живлення регулятора. Коли значення "LDO\_PD" низьке, регулятор увімкнено, а вихід використовується для всього мікросхеми. Коли "LDO\_PD" високий, подається зовнішня напруга 1,8 В безпосередньо, і регулятор обійдений.

### Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)

Таблиця 3-1 показує технічні характеристики аналого-цифрового перетворювача для трансивера SM2400.

## Технічні характеристики аналого-цифрового перетворювача

Вхідні дані	одновходовий
Кількість входів	1
Частота вибірки	До 2.5MSPS
Розрядність	12 біт
Вхідна пропускна здатність	$\leq 600$ кГц
Вхідний опір	$> 1$ тис $\Omega$
Діапазон вхідних сигналів	0V ~ AVDD_RX
Напруга живлення	3,0 В ~ 3,6 В
Живлення в режимі очікування	$<10$ мкА
INL	0,92 LSB
DNL	0,65 LSB
SNDR	$> 70$ дБ

## Цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП)

Таблиця 3-2 показує технічні характеристики цифрово-аналогового перетворювача для трансивера SM2400.

## Технічні характеристики цифрового аналогового перетворювача

Вихідна пропускна здатність	1,06 МГц (0 дБ)
Діапазон вихідних сигналів	0,3 ~ (AVDD_TX - 0,30) V
Напруга живлення	3,00 ~ 3,60 В
Живлення в режимі очікування	7,5 мкА
SNDR	74 дБ
INL	$<1,0$ LSB
DNL	$<0,5$ LSB
Відновлення від PD	$<10$ мкс (без фільтра)
Діапазон загасання	- 21 ~ 0 дБ
Крок загасання	3 дБ

Таблиця 3.3 наведено технічні характеристики підсилювача для трансивера SM2400.

## Технічні характеристики підсилювача

Коефіцієнт посилення розімкнутого циклу	> 100 000
Темп нарощування	23 В / мкс
Вхідний шум (5 кГц ~ 1 ГГц)	8 мкВ
Запас фази	68°
Струм живлення	0,88 мА

Таблиця 3.4 узагальнює сигнали управління спеціального призначення SM2400.

## Сигнали управління спеціального призначення

RXRANGE1	Активує зовнішній AGC; -12 дБ при твердженні.
ФІЛЬОВАНИЙ	Стверджується при виявленні вхідного пакета. Можна підключити до світлодіода.
TXEN	Вмикає зовнішній лінійний драйвер (РА) під час передачі.
АФІН	Увімкнення живлення зовнішнього ланцюга AFE, якщо він доступний (необов'язково).

Крім того, SM2400 має вхідний сигнал PNYERR, який може використовуватися для індикації станів помилок, таких як перенапруга або перегрів, про які повідомляє лінійний драйвер.

**GPIO.** SM2400 підтримує п'ять ІО загального призначення (GPIO): GPIO0, GPIO9, GPIO12, GPIO13, GPIO14. Ці GPIO доступні для використання клієнтською програмою, що працює на протоколі Core.

**JTAG.** Інтерфейс JTAG для розробки програмного забезпечення. Сканування меж не підтримується.

## Кристалічний генератор

Для пристрою SM2400 потрібен зовнішній кристалогенератор, який працює в паралельному режимі коливань на своїй основній частоті. Рекомендована схема генератора для SM2400 показана Rd, C1 і C2 визначаються конструкцією друкованої плати та властивостями кристалічного генератора.



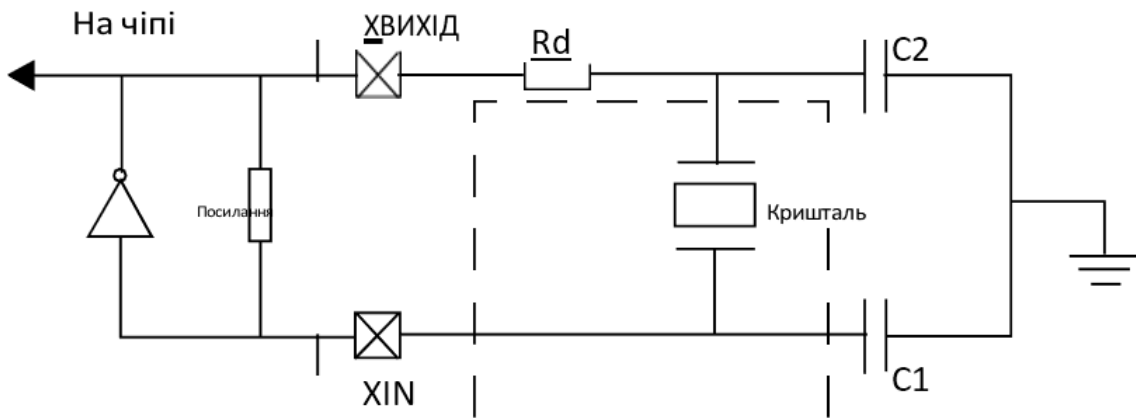


Рис. 3.10. Схема кристалічного генератора

Таблиця 3.5

Характеристики змінного струму кристалічного генератора

XTALT	Кристалічний тип	Паралельно				
XTALFREQ	Частота кристалів (основна)	12000				МГц
XTALTO	Загальна вимога до частоти (1)	± 50	± 25	± 25	± 25	ppm

**ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3**

1. Для вирішення проблеми передавання даних в діапазоні коротких хвиль пропонується використати технологі OFDM. Висока ефективність систем OFDM при роботі в каналах з багатопроменевим розповсюдженням радіосигналу робить їх придатними для високошвидкісних систем передачі даних в наземних системах зв'язку.
2. У розділі розроблено структурну схему OFDM – модема, який забезпечить роботу системи передачі даних ACARS у діапазоні коротких хвиль в умовах багатопроменевого розповсюдження радіосигналу.
3. Проведено розрахунок параметрів OFDM – модема.
4. Запропонована апаратурна реалізація OFDM – модема – велика інтегральна схема SM2400.

## ВИСНОВКИ

Приведений аналіз об'єкту дослідження показав, що система передачі даних ACARS виконує функції, що в значній мірі забезпечують безпеку польотів.

Для передачі інформації використовується ряд радіоканалів, кожний з яких має недоліки, що потребують усунення.

Перспективним напрямком є модернізація ВЧ каналу передачі даних.

В умовах відсутності наземної інфраструктури системи ACARS можливе використання інших систем передачі інформації, таких як супутникові системи та системи радіозв'язку високочастотного діапазону.

В умовах високої вартості використання супутникових систем радіозв'язку важливе значення має використання систем високочастотного радіозв'язку, що забезпечить при низькій вартості зв'язок на значні відстані влюбій точці знаходження повітряного судна..

Але реалізація високочастотного радіозв'язку ускладнюється особливостями розповсюдження радіохвиль ВЧ діапазону, які характеризуються багатопроменевим розповсюдженням. Багатопроменеве розповсюдження приводить до завмирання сигналів в точці прийому, нестабільності радіозв'язку або до пропаданя сигналу.

Існуючі методи боротьби з багатопроменевим розповсюдженням неможливо використовувати в системах авіаційного повітряного радіозв'язку, зокрема в системі передачі даних ACARS.

Для вирішення проблеми передавання даних в діапазоні коротких хвиль пропонується використати технологі OFDM. Висока ефективність систем OFDM при роботі в каналах з багатопроменевим розповсюдженням радіосигналу робить їх придатними для високошвидкісних систем передачі даних в наземних системах зв'язку.

У роботі розроблено структурну схему OFDM – модема, який забезпечить роботу системи передачі даних ACARS у діапазоні коротких хвиль в умовах багатопроменевого розповсюдження радіосигналу. Проведено розрахунок параметрів OFDM – модема. Запропонована апаратурна реалізація OFDM – модема – велика інтегральна схема SM2400.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Керимов Ю. А., Искендеров И. А. Особенности, функциональные возможности и перспективы применения системы asars в управлении полетами . proceedings of the conference topical researches of the world science (june 20-21, 2015) vol.ii rost publishing dubai 2015. с. 4-8.

2. Системи зв'язку з рухомими об'єктами / С.О. Кравчук, О.Г. Голубничий, А.Г. Тараненко, В.Г. Потапов, О.П. Ткаліч: підручник. – К.: Спринт-Сервіс, 2012. - 452 с.

3. Богданов А.В., Пукса Д.О., Романов Ю.В., Фомин В.В. Апаратура перспективных комплексов профессиональной КВ радиосвязи, радиопередающие устройства, радиомодемы // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь», ВТТВ – Омск, 2011. С. 76-81.

4. Федчун А.А. Способы формирования OFDM радиосигнала 2010. URL: [jre.cplire.ru/mac/jan10/5/text/.pdf](http://jre.cplire.ru/mac/jan10/5/text/.pdf) .

5. Технология OFDM [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов .— М. : Горячая линия – Телеком, 2017 .— 352 с.

6. Ріхтер С. Г., Смирнов Д.С. Система COFDM: характеристика і основні застосування // СУЧАСНЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ. Праці 18-ї Міжнародної науковотехнічної конференції, - М.: ФГУП МКБ «Електрон», 2010 р, С.41-45.

7. Ріхтер С. Г., Чалова Є.В. Комп'ютерне моделювання модему OFDM системи T-DAV // Міжнародний форум інформатизації (МФІ-2005). Праці конференції «Телекомунікаційні та обчислювальні системи». Schulze H., Lueders Ch. Theory and Application of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communication. Wiley & Sons, 2005.

8. Крейнделін В.Б., Колесников А.В. Оцінювання параметрів каналу в системах зв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням. Навчальний посібник / МТУСІ.-М., 2010.-29с.

9. Лебедев В. Модуляция OFDM в радиосвязи // *Радиолюбитель*. - 2008. - № 9. - С. 36-40.

10. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. Пособие.-М.: Эко-Трендз,2005.-392с.:ил.

11. Журавлев В.И., Трусевич Н.П. Методы модуляции-демодуляции радиосигналов в системах передачи цифровых сообщений. - М.:Инсвязьиздат,2009.-312с.: ил.

12. Интернет-ресурс <http://www.altera.ru>

13. Интернет-ресурс <http://www.altera.com>

14. Интернет-ресурс <http://www.3Dnews.com>

15. Интернет-ресурс <http://www.efo.ru>

16. Интернет-ресурс <ftp://ftp.efo.ru>

17. SM 2400. Интернет ресурс <https://www.adeptotech.com/ip/sm2400/>