

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,  
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА  
РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР**

**Тема:** «Модернізація комунікаційної лінії сегменту супутникової системи навігації  
GPS»

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ Владислав НЕСВАТ

(підпис)

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Олексій ГОЛУБНИЧИЙ

(підпис)

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_ Денис БАХТІЯРОВ

(підпис)

**Київ 2023**

# 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

Роман ОДАРЧЕНКО

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ на виконання кваліфікаційної роботи

Несвата Владислава Анатолійовича

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

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Модернізація комунікаційної лінії сегменту супутникової системи навігації GPS»

затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. № 421/ст

2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Аналіз структури супутникового комплексу, вивчення сигнальних складових комплексу, визначення необхідних сегментів та компонентів які підлягають дослідженню та подальшій модернізації.

4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз структури супутникового комплексу, інформація щодо сигнальних складових комплексу, комунікаційна лінія супутникової системи навігації та її пропонувані метод модернізації.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: Супутникова група, особливості роботи, Типи та покоління, чисельність і функціонал супутників, Склад повідомлення L1 C/A – GPS, Структура кадру, Кінцевий результат моделювання сигналів, Схема пропонуваного модулятора для тестового використання в комплексі GPS, Демодульовані інформаційні складові Q та I, за допомогою фазового зсуву.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023- 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Аналіз будови та особливостей супутникової системи навігації GPS	26.05.2023- 29.05.2023	Виконано
4	Передавання даних у супутниковій системі навігації GPS	30.05.2023- 07.06.2023	Виконано
5	Модернізація комунікаційної лінії GPS на основі використання багатопозиційних сигналів	08.06.2023- 14.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Олексій ГОЛУБНИЧИЙ  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис випускника)

Владислав НЕСВАТ  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Модернізація комунікаційної лінії сегменту супутникової системи навігації GPS» містить 47 сторінок, 16 рисунків, 5 таблиці, 12 використаних джерел.

GPS,МОДЕРНІЗАЦІЯ,КОМУНІКАЦІЙНА ЛІНІЯ,ЗВ'ЯЗОК,МОДУЛЯЦІЯ

Об'єктом дослідження – фігурує комунікаційна лінія.

Предмет дослідження – компонентна та елементна складова супутникової системи

Мета кваліфікаційної роботи – полягає в модернізації компонентів(елементів) комунікаційної лінії зв'язку,в перспективі це повинно забезпечити порівняно вищу пропускну здатність лінії зв'язку.

Метод дослідження – теоритичний.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при подальших дослідженнях модернізації комплексу GPS,необхідністю якого є подальше удосконалення системи та її ефективною реалізації.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1.АНАЛІЗ БУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ GPS.....	9
1.1. Комплекс GPS,склад та функції сегментів.....	9
1.1.1. Системи супутникового позиціонування.....	9
1.2. Космічна складова.....	11
1.2.1. Технічні особливості та перспективи.....	12
1.3. Наземна складова (Керуюча+допоміжна).....	14
1.3.1. Операційна Контрольна Система нового покоління.....	15
РОЗДІЛ 2.ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У СУПУТНИКОВІЙ СИСТЕМІ НАВІГАЦІЇ GPS.....	18
2.1. Функціональні дані GPS,типи доповнень.....	18
2.1.1. Навігаційні дані супутників GPS.....	18
2.1.2. Навігаційні дані функціонального доповнення SBAS.....	22
2.1.3. Дані авіаційних контрольно-корегувальних станцій.....	25
2.1.4. Навігаційні дані диференціальної GNSS.....	26
РОЗДІЛ 3.МОДЕРНІЗАЦІЯ КОМУНІКАЦІЙНОЇ ЛІНІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ.....	32
3.1. Сигнал L1 - його складові та особливості.....	32
3.1.1. Деталі порівняних модуляцій.....	35
3.1.2. Модуляції A-QPSK/A-BPSK.....	37
3.1.3. Модуляція OQPSK – Offset Quadrature Phase Shift Keying.....	38
3.2. Пропонований метод модуляції.....	39
3.2.1. Використання модулятора.....	40
ВИСНОВКИ .....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	47

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

GPS (Global Positioning System) – глобальна навігаційна система.

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурна фазова модуляція.

BPSK (Binary Phase Shift Keying – бінарна фазова модуляція.

SBAS (Satellite Based Augmentation System) - широкозонна система супутникової диференціальної навігації.

GNSS(Global Navigation Satellite System) – системи супутникової глобальної Навігації.

ГЛОНАСС – Глобальна Навігаційна Супутникова Система.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В сучасному світі значну увагу приділяють системам глобального позиціонування - Global Positioning System. Їх розвиток зумовлений необхідністю людства мати технології, які значним чином повинні спростити роботу більшості сфер людської діяльності. Такі великі галузі як: банкова система, фінансові ринки дуже сильно залежать від синхронізації часу в супутниковій системі. Деякі безпроводні сервіси та додатки взагалі не функціонують без неї. GPS рятує життя попереджуючи транспортні аварії, надає допомогу в рятувальних операціях, та пришвидшує доставку життєвоважливих та критичних засобів, також є незамінною в авіації для розробки транспортних додатків наступного покоління, яскравий приклад, плани остаточного впровадження системи GPS, як єдиної, навігаційної системи яка буде використовуватись в авіації. Важливою, є й наукова роль даного комплексу, моніторинг землетрусів, погодних умов та охорона природнього середовища. В довершенні GPS відіграє важливу роль в безпеці США та країн союзниць, плануванні військових операцій, всі сучасні військові девайси та техніка оснащенні цією системою.

У ході написання кваліфікаційної роботи були опрацьовані необхідні матеріали. В зв'язку з поставленою метою роботи та об'єктом дослідження, було прийняте рішення обрати метод модернізації, який полягає в заміні методу модуляції сигналів. Даний метод передбачав собою заміну теперішньої бінарної фазової модуляції (BPSK) на більш вигідну з точки зору спектральних та інформаційних складових – квадратурну фазову модуляцію (QPSK), що в перспективі дозволить передавати 2 біт-и/с, інформації, порівняно з наявним 1-біт/с.

Проте, будь-яка система, яка була розроблена в недалекому минулому, вже сьогодні потребує оновлення або заміни на більш продуктивну та ефективну. Це ж стосується і GPS. Щоб замінити повністю дану систему, необхідно розробити її аналог який буде відповідати сучасним вимогам, а оскільки такі процедури по розробці нових є наддорогими, то простіше розглянути варіант модернізації.

**Мета і завдання дослідження.** Метою данної роботи є дослідження методу вдосконалення GPS, який передбачає покращення пропускної здатності лінії зв'язку.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання.

1. Дослідження комплексу в рамках загальних даних, окреслення області досліду (сегменту, лінії тощо...), вивчення принципів та можливостей модернізації системи.

2. Вивчення існуючих методів вирішення данної проблеми.

3. Розробка власної методики, або покращення існуючих.

**Об'єктом дослідження** – фігурує комунікаційна лінія.

**Предметом дослідження** – компонентна супутникова та наземна сегментна складові супутникової системи.

**Методи досліджень.** Метод дослідження – теоритичний.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Дана робота являється теоритичною. Результати досліджень, по модернізації комунікаційної лінії, рекомендовано використовувати в подальших дослідженнях та наукових працях.

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

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2023 р.



# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ БУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ GPS

### 1.1. Комплекс GPS, склад та функції сегментів

Супутникові радіонавігаційні системи є всепогодними системами космічного базування, які дають змогу в глобальних масштабах визначати місцеположення рухомих об'єктів та їхню швидкість у певний момент часу, а також здійснювати точну координацію часу [1].

Принцип роботи комплексу полягає в випромінюванні спец. радіосигналів супутниками, кінцеві споживачі отримують данні сигнали після оброблення на стаціонарних або ж переносних пристроях, отримуючи дані про швидкість або місцеположення об'єкта в реальному часі чи в заданий момент часу.

#### *1.1.1. Системи супутникового позиціонування.*

Супутникова радіонавігаційна система – це високотехнологічна інформаційна система що складається з п'яти основних сегментів:

1. Космічний;
2. Наземний-керуючий;
3. Космічних доповнень;
4. Наземних доповнень;
5. Користувачів.

Космічний сегмент є системою навігаційних супутників, що рухаються по еліптичних орбітах навколо Землі. На кожній орбіті перебувають декілька супутників. Навігаційний супутник має на борту стандарт часу та радіоелектронну апаратуру, що випромінює в напрямку Землі шумоподібні безперервні радіосигнали. Ці сигнали містять інформацію, необхідну для проведення навігаційних визначень за допомогою апаратури споживача. Завдяки достатній кількості навігаційних супутників і

спеціальних параметрів радіосигналів апаратура споживача може в будь-який час за будь-яких погодних умов приймати випромінені супутниками сигнали та визначати місцеположення, швидкість і поточний час споживача (рисунок 1.1).

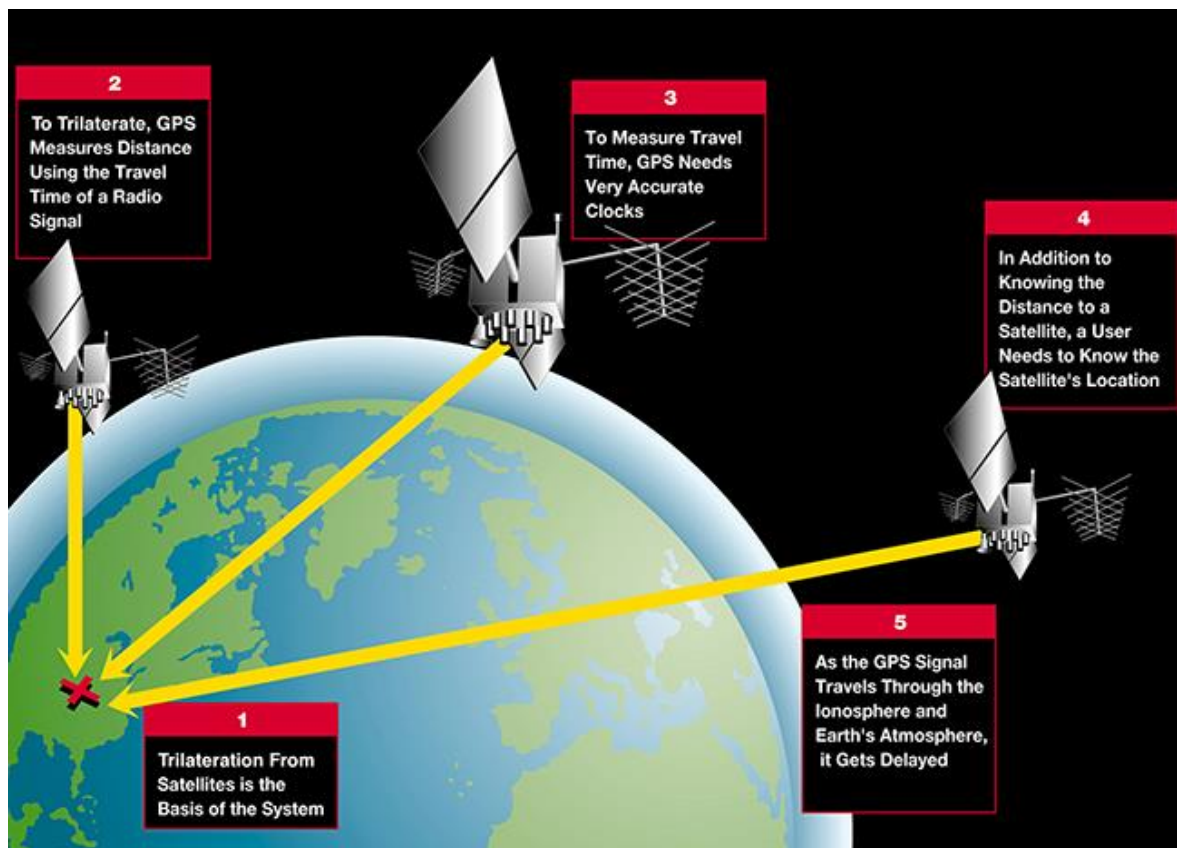


Рис. 1.1. Супутникова група, особливості роботи

Наземний керуючий сегмент у своєму складі має центр керування космічним сегментом, радіолокаційні й оптичні станції спостереження за навігаційними супутниками та апаратуру контролю за станом навігаційних супутників. Керуючий сегмент визначає, прогнозує й уточнює параметри руху навігаційних супутників, формує й передає в бортову апаратуру супутників відповідну цифрову інформацію, а також виконує ряд контрольних і профілактичних функцій. Сегменти космічних і наземних функціональних доповнень являють собою апаратно-програмні комплекси, призначені для забезпечення точності. Призначення та функції цих доповнень розглядаються далі. Сегмент користувачів потенційно може складатися з необмеженої кількості супутникових навігаційних приймачів, які приймають сигнали навігаційних супутників і виконують розрахунки місцеположення, швидкості

й поточного часу з похибками, зумовленими характеристиками супутникової навігаційної системи та апаратури споживача [4].

## 1.2. Космічна складова GPS

Зупинимось детальніше саме на космічній частині комплексу GPS

Космічний сегмент супутникової системи глобального позиціонування ``GPS``, являє собою сузір'я супутників. На нинішній час налічується 24, це основне «ядро» приблизно 95% від загальної кількості, які розташовані на операційній висоті в 12250 миль, шести рівно-віддалених орбітах, на кожній по чотири супутники. Саме ці 24 супутники забезпечують потреби як цивільних так і військових користувачів. Зазвичай число данних супутників більше двадцяти чотирьох, сюди входять як резервні так і «екстра»-здатні збільшити ефективність роботи системи, але при цьому не належать до основного «ядра». В 2011 році була закінчена операція ``Expandable-24`` з виведення «екстра» супутників, на операційні орбіти основного «ядра», в результаті значно збільшилась якість роботи і точність позиціонування системи для користувачів (рисунок 1.2).

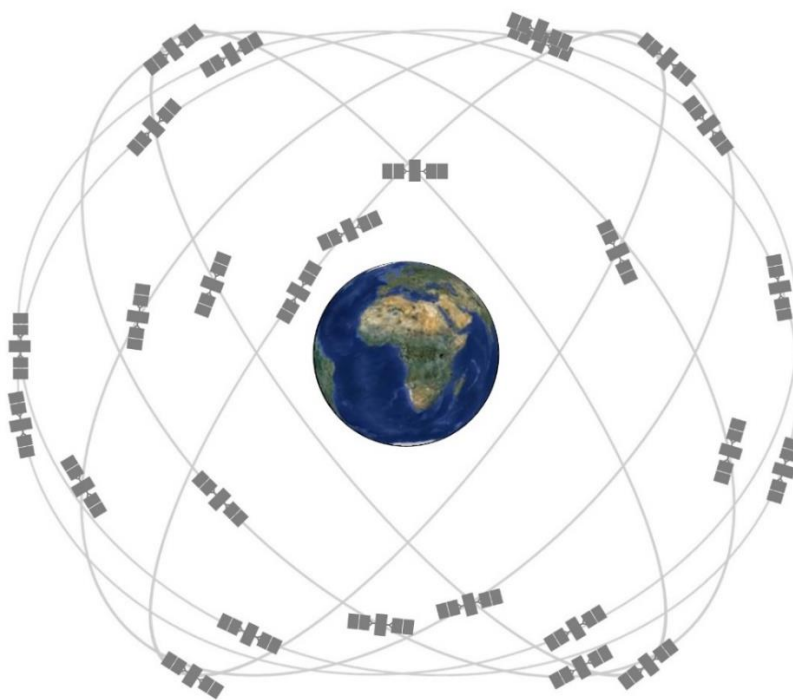


Рис. 1.2. Система супутників GPS, після проведення ``Expandable-24``

Початком розробки системи глобального позиціонування прийнято вважати 197-Х роки. Започаткував цей процес департамент захисту США (U.S. DoD-Department of Defense). Вже 23 грудня, 1978 року - запуск перших супутників системи GP, їх ще прийнято називати першою генерацією (first generation-BLOCK 1). В квітні 27, 1995 всю систему було прийнято як ``full operational`` - тобто введеною в стрій.

### ***1.2.1. Технічні особливості та перспективи***

Так чи інакше за останні роки двадцятого століття, дана система не мала значних нововведень та поліпшень, це стосувалось як наземної складової, супутникової та власне самих випромінюваних сигналів, тобто залишалась в "базовій комплектації".

Вже в 21 столітті виникли проблеми пов'язані з необхідністю вдосконалення системи, аби відповідати тодішнім вимогам та нормам, план передбачав 15-річний термін вдосконалення системи. Починаючи з 1997 року, спеціальним технічним комітетом було розроблено "дорожню карту" (Executive Board (IGEB)) для дослідження нових методів модернізації системи. В якості цивільних потреб, були висунуті критерії які передбачають покращення якості роботи стандартного сервісу позиціонування - SPS (Standard Positioning Service). SPS відноситься до вільних для використання цивільними, сервісом, який надає базовий функціонал, передбачає, що використання даного, буде в цілях: наукових, комерційних та в загальному мирних. Даний сигнал, (The Course-Acquisition C/A coded signal at L1 frequency) використовується саме в SPS.

В 1991 році було впроваджено технологію спотворення (деградації) інформації - SA (Selective Availability), дане доповнення робить неможливим точну роботу цивільних сервісів позиціонування. В плані військових цілями модернізації були визначені окремі складові системи PPS (Precise Positioning Service), власне дана система використовується обмеженим колом союзників, та спецслужбами США, в цілях яких є охорона від несанкціонованого доступу та використання даного комплексу. Єдина лінія Y, код якої модулюється на частоті L2 для військових потреб.

Серед загальних цілей, по програмі модернізації в офіційному документі FRP of. U.S. заявлені такі:

1. "Покриття землі"
2. Витривалість до поломок та зависань
3. Витривалість до природніх чиників та ворожих атак(кібер атак та фізичних)
4. Витривалість до "інтерференції" на ФМ радіо частотах.
5. Ефективність обміну інформацією(Real-time response)
6. Висока точність позиціонування
7. Доступність інформації
8. Надійність системи навігації

На даний момент, тобто 2023 рік, найновіша версія супутників – GPS III (рисунок 1.3). Дана версія супутників була розроблена компанією LM – Lockheed Martin. Операційна висота – 12,550 миль над землею. Згідно плану, будуть знаходитись на данній висоті до повного збору сузір'я.


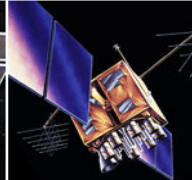
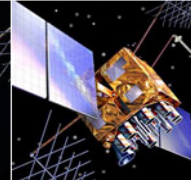
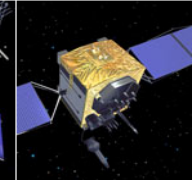
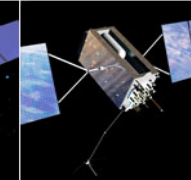
LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
0 operational	7 operational	7 operational	12 operational	5 operational
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users</li> <li>▪ Precise P(Y) code on L1 &amp; L2 frequencies for military users</li> <li>▪ 7.5-year design lifespan</li> <li>▪ Launched in 1990-1997</li> <li>▪ Last one decommissioned in 2019</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ C/A code on L1</li> <li>▪ P(Y) code on L1 &amp; L2</li> <li>▪ On-board clock monitoring</li> <li>▪ 7.5-year design lifespan</li> <li>▪ Launched in 1997-2004</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ All legacy signals</li> <li>▪ 2nd civil signal on L2 (L2C) <a href="#">LEARN MORE →</a></li> <li>▪ New military M code signals for enhanced jam resistance</li> <li>▪ Flexible power levels for military signals</li> <li>▪ 7.5-year design lifespan</li> <li>▪ Launched in 2005-2009</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ All Block IIR-M signals</li> <li>▪ 3rd civil signal on L5 frequency (L5) <a href="#">LEARN MORE →</a></li> <li>▪ Advanced atomic clocks</li> <li>▪ Improved accuracy, signal strength, and quality</li> <li>▪ 12-year design lifespan</li> <li>▪ Launched in 2010-2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ All Block IIF signals</li> <li>▪ 4th civil signal on L1 (L1C) <a href="#">LEARN MORE →</a></li> <li>▪ Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity</li> <li>▪ No Selective Availability <a href="#">LEARN MORE →</a></li> <li>▪ 15-year design lifespan</li> <li>▪ IIF: laser reflectors, search &amp; rescue payload</li> </ul>

Рис. 1.3. Типи та покоління, чисельність і функціонал супутників

GPS III SV06,25-й, для військових потреб. Даний супутник включений до сузір'я, покликаний забезпечити космічні сили США та цивільних користувачів по всьому світу наступними можливостями PNT:

- Позиціонування (Position)
- Навігація (Navigation)
- Таймінг. (Timing)

GPS III забезпечує порівняно кращі результати в точності та захисту від взлому, аніж наявні в сузір'ї старші моделі. Аби відповідати поставленим задачам та несподіваним ситуаціям, компанія зробила свої супутники модульними, таким чином впровадження нових технологій та можливостей стає легшим. На даний момент Lockheed Martin розробляє нову модель GPS III Follow On (GPS III F) для космічних сил, як заявлено більш «іноваційну та з значно ширшими можливостями» порівняно з попередниками. GPS III F модель повинна мати спеціальний функціонал: “accuracy-enhancing laser retroreflector array, a new search and rescue payload, a fully digital navigation payload and more next-generation technology” [6].

### **1.3. Наземна складова (Керуюча+допоміжна)**

Сегмент керування GPS складається з глобальної мережі наземних засобів, які відстежують супутники GPS, моніторять передачу сигналів, виконують аналізи та надсилають команди та дані до сузір'я (рисунки 1.4).

Як частина програми модернізації комплексу GPS, ВПС США продовжують покращувати сегмент управління впродовж років. Модернізація наземної складової є необхідною, так як нові типи супутників потребують нового, або значно покращеного обладнання та ПЗ для стабільної і безпечної роботи всіх сегментів.

### *1.3.1. Операційна Контрольна Система нового покоління*

Операційна Контрольна Система (Operational Control System - ОСХ) – нова версія системи наступного покоління, керівного сегменту. ОСХ покликана забезпечити роботу наявних, модернізованих та нового покоління супутників, оперуючи як цивільними так і військовими типами сигналів, надати покращений кіберзахист та гнучкість.

Склад данної системи:

- Головна керуюча станція та резервна
- Спеціалізовані моніторингові станції
- Наземні антени
- GPS системний симулятор
- Стандартизований космічний тренажер.

ОСХ розробка відбувається поетапно:

- Block 0 – це система запуску та керування (LCS - Launch and Control System), призначена для керування операціями запуску та перевірки на орбіті (LEO) всіх супутників GPS III. ОСХ Block 0 – це підсистема, ОСХ Block 1, яка забезпечує апаратне забезпечення, програмне забезпечення та базу кібербезпеки для Block 1. Block 1 – надає оперативні можливості з контролю супутників старіших версій, цивільні сигнали (L1 C/A), військові сигнали (L1P(Y)), (L2P(Y)), а також супутники нових генерацій по типу GPS III та модернізований цивільний сигнал (L2C), авіаційний сигнал безпеки польоту (L5). Крім того, Block 1 забезпечить базову оперативну здатність контролювати модернізовані військові сигнали (L1M і L2M (M-код)), а також глобально сумісний сигнал (L1C). Він також повністю відповідає вимогам забезпечення безпеки інформації/кіберзахисту.
- Block 2 містить розширені оперативні можливості для керування розширеними функціями модернізованих військових сигналів (L1M і L2M (M-код)). Блок 2 буде доставлено одночасно з Блоком 1 [8].
- Block 3F оновить ОСХ новими можливостями для синхронізації з GPS III F Space Segment і можливостями військового обладнання користувача

GPS(MGUE)Increment 2.OCX Block 3F необхідний для запуску та оперативного управління, керування космічними апаратами GPS III F [11].

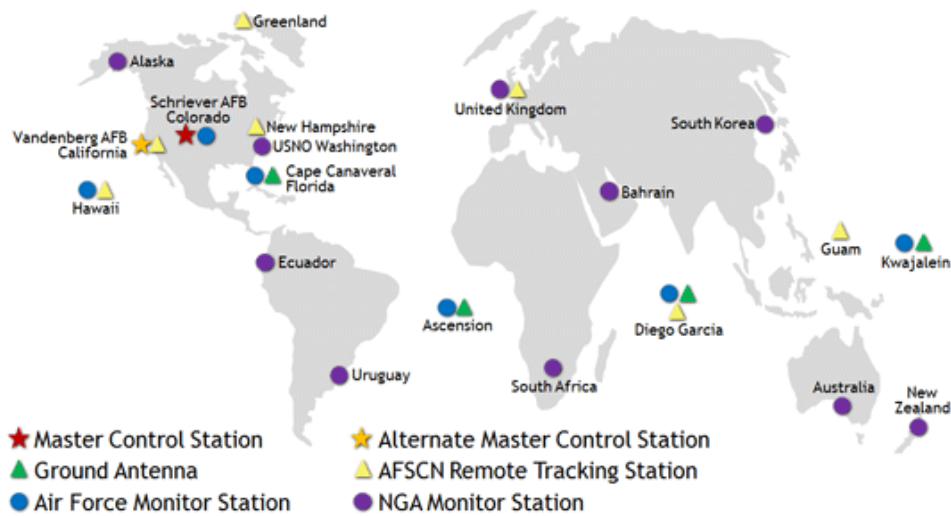


Рис. 1.4. Мапа контрольних пунктів – наземного сегменту (Control Segment).

Моніторингові станції:

- Відслідковування супутників
- Прийом навігаційних сигналів, вимір дистанції та атмосферних даних.
- Передача даних до головної станції (Master Control Station)
- Використання складних GPS ресиверів
- Забезпечують глобальне покриття за допомогою 16 станцій: 6 – військових станцій ВПС США і 10 NGA – загального користування.

Центр керування:

- Забезпечує керування та контроль над сузір'ям GPS супутників.
- Використовує моніторингові станції для збору даних, та коригує положення супутників відносно орбіти.
- Генерує навігаційні повідомлення для супутників.
- Моніторить стан радіоефіру та цілісності зв'язку, справності та точності спутників.
- Приймає участь в обслуговуванні, репозиціонуванні сузір'я супутників.



- На даний час використовуються різні системи (AEP & LADO) для контролю над операційними та неактивними супутниками.

- Забезпечується резервною, повнофункціональною станцією центру керування. (Alternate Master Control Station).

Наземні антени:

- Надсилають команди, оновлення навігаційних даних, оновлення ПЗ для супутників.

- Збір телеметрійних даних.

- Комунікація за допомоги S-поясу.

- Налічує 4 - спеціалізовані наземні антени, та 7 – дистанційно керованих станцій ВПССКМ – Військово Повітряні Сили, Супутникова Контрольна Мережа (Air Force Satellite Control Network (AFSCN)).

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1**

В данному розділі було розглянуто загальні данні щодо глобальної супутникової системи позиціонування. Розділ передбачав собою окреслення загальних відомостей та особливостей будови, складу данної системи, були виділені певні складові системи такі як космічна складова та наземна, які беруть безпосредню участь в комунікації та обміном специфічною інформацією.

## РОЗДІЛ 2

### ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У СУПУТНИКОВІЙ СИСТЕМІ НАВІГАЦІЇ GPS

#### **2.1. Функціональні дані GPS, типи доповнень**

Передавання даних в супутниковій системі глобального позиціонування. GPS прилад отримує сигнали від навігаційних супутників і, обробляючи їх, здатний визначити координати свого місцезнаходження, висоту над рівнем моря, швидкість і напрямок вектору руху. Сигнали супутників також містять дані про точний час (атомний годинник супутників + корекція) і дату, по яким прилад GPS може синхронізувати свій внутрішній годинник. Багато пристроїв GPS стеження мають ще входи для аналізу логічних і аналогових датчиків, керуючі виходи для впливу на систему, а також контролери цифрових шин. Багато приладів дають можливість дистанційно змінювати свої налаштування і режими [1].

##### ***2.1.1. Навігаційні дані супутників GPS***

Потік навігаційних даних, що передаються від супутників GPS, має швидкість 50 біт/с. Тривалість інформаційного символу 0 чи 1 становить 20 мс. Основне повідомлення (представлено на (рисунку 2.1.)), що передається від кожного навігаційного супутника GPS, формується у вигляді кадру. Кадр складається з п'яти підкадрів (табл. 2.1). Підкадри 1, 2 і 3 містять по 300 інформаційних символів, які діляться на 10 слів (у кожному слові - по 30 символів). Підкадри 4 і 5 містять по 25 сторінок. Кожна сторінка складається з 300 інформаційних символів (або розрядів), що також поділені на 10 слів (по 30 символів у слові) [1].

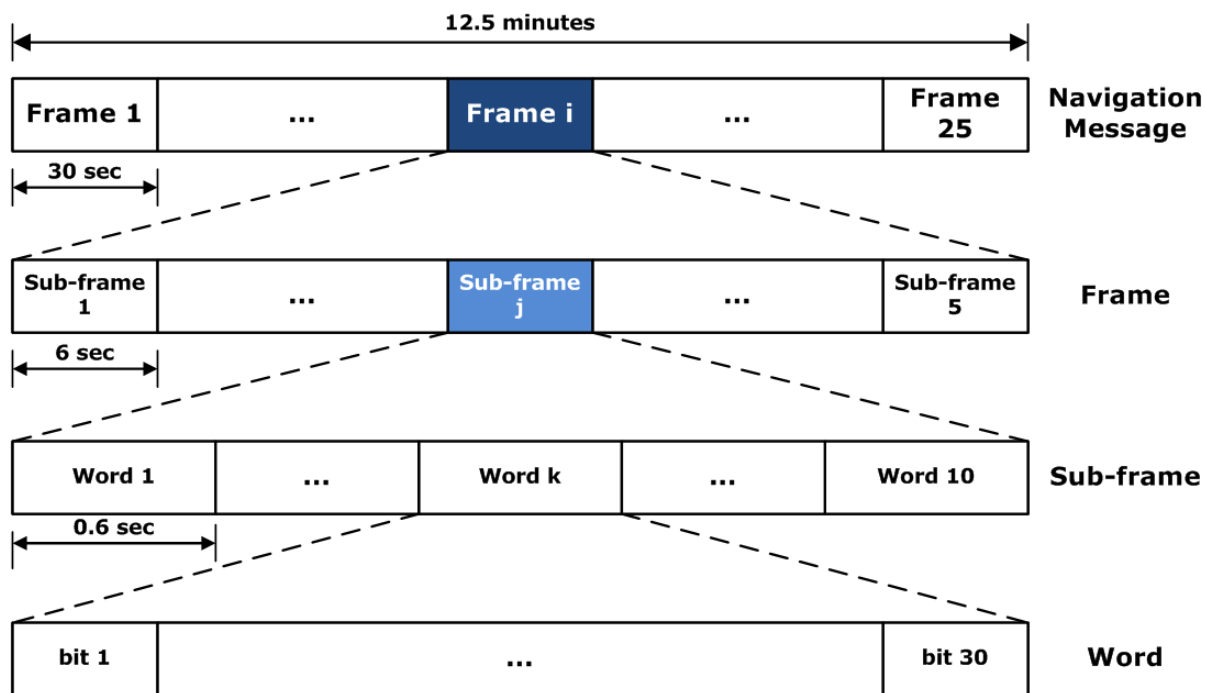


Рис. 2.1. Склад повідомлення L1 C/A – GPS

Отже, сформований кадр завжди має підкадри 1, 2 і 3, одну сторінку з підкадру 4 та одну сторінку з підкадру 5. Оскільки обсяг кожного рядка (сторінки) становить 300 символів, а тривалість символу дорівнює 20 мс, то тривалість передавання кадру з п'яти підкадрів становить 30 с, передавання рядка (сторінки) - 6 с, а передавання всього повідомлення (25 кадрів) - 12,5 хв. Період повторення підкадрів 1, 2 і 3 - 30 с; періоди повторення сторінок з підкадрів 4 і 5 - більші, що зумовлено значущістю передаваної інформації [1].

Таблиця 2.1.

#### Структура кадру

Зміст кадр	Слова, що становлять зміст сторінки	Зміст слів 3...10
Підкадр 1 (одна сторінка)	1 (TLM), 2 (HOW), 3... 10	Номер тижня GPS, точність, стан і параметри корекції часу супутника
Підкадр 2 (одна сторінка)	1 (TLM), 2 (HOW), 3... 10	Інформація про ефемериди супутника

Підкадр 3 (одна сторінка)	1 (TLM), 2 (HOW), 3... 10	Інформація про ефемериди супутника
Підкадр 4 (25 сторінок)	1 (TLM), 2 (HOW), 3... 10	Альманах і стан супутників з номерами 25...32, конфігурація супутників, ознаки, дані іоносфери і всесвітня шкала часу (ПТС), спеціальні повідомлення, резервні розряди
Підкадр 5 (25 сторінок)	1 (TLM), 2 (HOW), 3... 10	Альманах і стан супутників з номерами 1...24, опорний час, номер тижня альманаху, резервні розряди

Рядок (сторінка) підкадрів 1 ...5 починається зі слів TLM (перше слово) і HOW (друге слово), після яких ідуть слова 3... 10 (рис. 2.14). Слово рядка (сторінки) підкадрів 1...5 містить 30 символів (розрядів). Шість молодших розрядів кожного слова мають перевірні символи для контролю й перевірки правильності передаваної інформації. Перше слово телеметрії (TLM) має преамбулу (8 старших розрядів), телеметричне повідомлення для санкціонованих споживачів, 2 резервні розряди та 6 молодших розрядів для перевірних символів. Друге слово передавання (ключ - HOW) містить 19 молодших розрядів 29-розрядного Z-відліку, 3 розряди (20, 21, 22) для ідентифікатора підкадру, 2 розряди (23, 24) резервні і 6 розрядів перевірних символів. Ідентифікатор для підкадрів 1...5 набуває відповідно значень 001, 010, 011, 100, 101. Кожен навігаційний супутник формує 1,5-секундну епоху (момент часу) для точного відліку та прив'язування часу. Відлік часу, встановлений таким чином, називається Z-відліком. Z-відлік надається споживачеві у вигляді 29-розрядного двійкового числа. Десять старших розрядів (MSB) Z-відліку є двійковим зображенням послідовного номера поточного тижня. Відлік тижнів перебуває в межах від 0 до 1023. Нульовий стан відповідає тому тижню, що починається з 1,5-секундної епохи в

нульовій (приблизно) часовій точці всесвітнього часу (UTC). По закінченні GPS-тижня з номером 1023 номер тижня скидається в 0. При цьому споживач, переходячи від системного часу GPS до календарної дати, враховує (додає) попередні 1024 тижні. Тиждень - це найбільша одиниця вимірювання часу в системі GPS, яка дорівнює 604 800 с, або 7 діб x 24 год x 60 хв x 60 с. Нульовий відлік часу GPS почався опівночі з 5 на 6 січня 1980 р. Дев'ятнадцять наступних розрядів Z-відліку, розташованих у слові 2 (HOW), є кількістю 1,5-секундних інтервалів, відлічених від моменту переходу "кінець/початок" будь-якого тижня. Відлік перебуває в межах від 0 до 403 199. Число 403 199 - кількість 1,5-секундних інтервалів у тижні (604 800 с). Інформація, яка передається протягом тижня в 17 старших розрядах слова 2 в десятковому еквіваленті, змінюється в діапазоні від 0 до 100 799 з кроком, що відповідає тривалості передавання інформації одного підкадру 6 с. Зазначимо, що протягом тижня кожен навігаційний супутник транслює споживачам 100 800 підкадрів (рядків) [1].

Доповнюючи дану інформацію слід зазначити що такі типи даних напряму залежать від певних конструкційних, природи передаваних сигналів, навколишнього середовища та технічних особливостей як супутників так і наземних станцій, тому слід враховувати наступні моменти:

1. Завантаження відбуваються один раз на день або частіше, якщо потрібно, щоб помилка діапазону користувачів (URE) не перевищувала специфікації.
2. Щоб обчислити час надходження сигналів GPS, GPS-приймач повинен точно знати час.
3. Якщо GPS-приймач може отримувати сигнали лише від 3 супутників, ви все одно можете визначити своє місцезнаходження, але воно буде менш точним.
4. Сучасний GPS-приймач зазвичай відстежує всі доступні супутники одночасно, але лише певна група з них буде використовуватися для обчислення вашого положення.

### **2.1.2. Навігаційні дані функціонального доповнення SBAS**

SBAS — це геосинхронні супутникові системи, які надають послуги для підвищення точності, цілісності та доступності основних сигналів GNSS.

Повідомлення, що передаються із супутників SBAS, формуються послідовно. Вони містять преамбулу, ідентифікатор типу повідомлення, поля даних і символів контролю з використанням надлишкового циклічного коду 93. Преамбула (8 біт) складається з двох двійкових розрядів, поділених на три послідовні блоки: 01010011, 10011010, 11000110. Початок кожної нової 24-розрядної преамбули синхронізується з 6-секундною епохою кадру GPS. 96 Ідентифікатор типу повідомлення має 6-розрядне значення, яке вказує на тип повідомлення (від 0 до 63) і передається старшими розрядами вперед. Дані повідомлення займають 212 двійкових розрядів. Кожен параметр поля даних передається старшими розрядами вперед. CRC-код кодує надлишкові повідомлення SBAS. Його довжина  $\ell = 24$  біт. Типи і зміст повідомлень SBAS: 0 - “не використовувати” (режим перевірки SBAS);

1 - маска PRN;

2 ...5 - швидкі поправки;

6 - дані про цілісність супутників;

7 - коефіцієнт деградації швидких поправок;

8, 11, 13...16, 19...23, 28...61 - не зайнято;

9 - далекомірна функція супутника GEO;

10 - параметри деградації;

12 - параметри зсуву “мережний час SBAS/UTC”;

17 - альманахи супутників GEO;

18 - маска точок іоносферної мережі (IGP);

24 - змішані (швидкі та довготермінові) поправки до похибок супутників;

25 - довготермінові поправки до похибок супутників;

26 - поправки до затримок в іоносфері;

27 - сервісне повідомлення SBAS;

62 - зарезервовано;

63 - нульове повідомлення.

Кожен тип повідомлення містить специфічну інформацію яка передається в конкретному типі. Деякі з функціональних повідомлень наведені нижче, такі як:

1. Повідомлення типу 1 - (маска PRN), має 210 значень, що відповідають номерам PRN-кору супутників, хоча в даний час вико-ристовується 51 значення. Перший переданий розряд маски PRN відповідає PRN-кору номер один. Номери PRN-кору ідентифікують PRN- індивідуальний номер супутника після йде розподілення між адресатами: 1...37 - GPS; 38...61 - ГЛОНАСС; 62... 119, 139...210 — вільні; 120... 138 – SBAS.

2. Повідомлення типів 2...5 - (швидкі поправки) містять в собі такі данні як: IODF - ознака набору даних для швидких поправок, яка пов'язує параметри /СШР, зі швидкими поправками. Індекс  $y = 2...5$  означає тип повідомлення, до якого застосовується ознака /ОД/у (ідентифікатор типу швидкої поправки +2) IODP має визначення у коментарі до повідомлення типу I і інші до 63-го типу. Загальні данні SBAS щодо тривалості дії даних, які передаються, наведені в таблиці 2.2 [1].

Таблиця 2.2

### Загальні данні SBAS

Тип даних	Максимальний інтервал передавання, с	Виміри відстані	Стан супутників в GNSS	Стандартні диференціальні поправки	Точні диференціальні поправки	Відповідні типи повідомлень
SBAS у режимі перевірки	6	-	-	-	-	0
Маска PRN	120	-	R*	R	R	1
UDREI	6	-	R*	R	R	2...6;24
Швидкі поправки	60	-	R*	R	R	2...5;24
Довготермінові поправки	120	-	R*	R	R	24;25

Далекомірна функція GEO	120	R	-	-	-	9
Деградація швидких поправок	120	-	R*	R	R	7
Параметри даградації	120	-	-	-	R	10
Маска іоносферної сітки	300	-	-	-	R	18
Іоносферна поправка GIVEI	300	-	-	-	R	26
Зсув часу	300	-	-	-	-	12
Альманах супутників	300	R	R	R	R	17
Рівень обслуговування	300	-	-	-	-	27

В формулювані даних типів повідомлень можна зазначити певні технічні особливості системи SBAS:

1. Точність підвищується завдяки передачі широкомасштабних поправок на помилки діапазону GNSS.
2. Цілісність покращується мережею SBAS, яка швидко виявляє помилки супутникового сигналу та надсилає сповіщення приймачам про те, що їм не слід відстежувати несправний супутник.
3. Доступність сигналу можна покращити, якщо SBAS передає сигнали дальності зі своїх супутників.



### 2.1.3. Дані авіаційних контрольно-корегувальних станцій

Дані передаються в системі часового поділу передавання даних (ТОМА), яка базується на кадрах і часових інтервалах. Тривалість кожного кадру - 500 мс. У кожній односекундній епосі ІТГС містяться два кадри: перший починається на початку епохи, другий - через 0,5 с після початку. Кадр поділяється на вісім окремих часових інтервалів тривалістю 62,5 мс. Контрольно-корегувальні станції виділяються відповідні часові інтервали, що позначаються літерами А, В, С, О, Е, И, в, Н (таблиця 2.3), і присвоюється ідентифікатор часового інтервалу (БЗГО) [1].

Таблиця 2.3

Дані "ТОМА"

Часовий інтервал	Десятковий код	Двійковий код
А	0	000
В	1	001
С	2	010
Д	3	011
Е	4	100
Ф	5	101
Г	6	110
Н	7	111

Дані передаються в пакетному режимі. Протягом 2,5 с передається п'ять кадрів, поділених на вісім часових інтервалів. Кожен часовий інтервал повинен вміщувати один пакет повідомлень. Наприклад, якщо виділено перший часовий інтервал, то в ньому передаються дані, що становлять один пакет повідомлень. Зміст пакета від кадру до кадру може змінюватися. Основною частиною 109 пакета є скрембльовані

дані. Максимальна довжина цієї частини - 1841 біт; мінімальна довжина не обмежується. До скремблювання дані формуються в такій послідовності: формуються додатки блоків повідомлень; формується завадостійке кодування (FEC) повідомлень; кодується додатки блоків повідомлень. Дані додатків складаються з одного чи більше блоків. Для контрольнокорегувальної станції в даний час можуть передаватися чотири типи повідомлень:

1. - Поправки до псевдовідстаней (PRC і RRC);
2. - Інформація про контрольнокорегувальну станцію;
3. - Інформація про кінцеву ділянку заходження на посадку;
4. - Прогнозована експлуатаційна готовність далекомірного джерела. До складу скремблених даних входять такі елементи: ідентифікатор часового інтервалу контрольнокорегувальної станції (3 біт); довжина передавання (17 біт); FECH встановленої послідовності (5 біт); блоки повідомлень (< 1776 біт); FEC блоків повідомлень (48 біт); заповнювачі (2 біт). У заголовку всіх чотирьох типів повідомлень містяться такі дані: ідентифікатор блоку повідомлення - 10101010 (нормальне повідомлення); 11111111 (тестове повідомлення); ідентифікатор контрольнокорегувальної станції - 24 біт; ідентифікатор типу повідомлення - 00000001 (тип 1); 00000010 (тип 2); 00000100 (тип 4); 00000101 (тип 5); довжина повідомлення - 8 біт. Блок повідомлень містить заголовок (48 біт), повідомлення (до 1696 біт), циклічний надлишковий код і CRC-код (32 біт) [1].

#### ***2.1.4. Навігаційні дані диференціальної GNSS***

Спеціальний комітет RTCM 103 розробив Рекомендовані стандарти для диференціальної GNSS, призначені переважно морським користувачам. Формат повідомлень, що передаються користувачам радіоканалами з диференціальної (референсної) корегувальної станції, близький до формату навігаційної інформації супутників GPS. Відмінність полягає лише в тому, що довжина підкадру в ньому не фіксується [1].

Кожне повідомлення містить  $2 + N$  слова. Перші два основні слова формату передають інформацію  $N$  словам, власне це і є повідомленням.

Таблиця 2.4

Дані "GNSS"

Слово	Зміст			Довжин біт	Роздільна здатність	Діапазон значень	
Перше	Преамбула			8	-	-	
	Тип повідомлення			6	1	1...64	
	Ідентифікатор референсної станції			10	1	0...1023	
	Перевірні символи			6	Згідно з ICD-GPS-200C[95]		
Друге	Модифікований Z-відлік			13	0.6 с	0...3599.4с	
	Номер послідовності			3	1	0...7	
	Довжина кадру			5	Одне слово	0...31 слово	
	Цілісність (стан) референсної станції			3	-	-	
	Перевірні символи			6	Згідно з ICD-GPS-200C[95]		
1...8		9...14		15...24		25...30	
Преамбула 01100110		Тип повідомлення (ідентифікатор кадру)		Ідентифікатор референсної станції		Перевірні символи	
MSB	...	LSB	MSB		LSB	MSB	...
1...13		14...16		17...21		22...24	
Модифікований Z-відлік		Номер послідовності		Довжина кадру		Цілісність референсної станції	
MSB	...	LSB		MSB	...	LSB	
1...13		14...16		17...21		22...24	
Модифікований Z-відлік		Номер послідовності		Довжина кадру		Цілісність референсної станції	
MSB	...	LSB		MSB	...	LSB	

Кожне повідомлення містить  $2 + N$  слова. Перші два - головні слова формату, які передають інформацію  $N$  словам, що є власне повідомленням. Преамбула призначена для ідентифікації повідомлення користувачем. Модифікований Z-відлік

повідомляється користувачеві в кожному попередньому кадрі для наступного. Модифікований Z-відлік - це послідовність двійкових символів від 0 до 5999, що еквівалентне 6000 відліків за годину; дискретність - 0,6 с. Як приклад, у таблиці 2.4 наведено відповідності модифікованого Z-відліку у двійкових символах і секундах. Номер послідовності допоміжний у кадровій синхронізації. Він заміняє послідовний Z-відлік як зростаючий параметр і в кожному кадрі збільшується. Коди індикації стану референсної станції:

111 - референсна станція не функціонує;

110 - передавання з референсної станції не перевірене;

101 - масштабний коефіцієнт  $UDRE = 0,1$ ;

100 -  $UDRE = 0,2$ ;

011 -  $UDRE = 0,3$ ;

010 -  $UDRE = 0,5$ ;

001 -  $UDRE = 0,75$ ;

000 -  $UDRE = 1$ .

Типи і зміст повідомлень:

1 (фіксоване) - диференціальні корекції GPS;

2 (фіксоване) - збільшення диференціальних корекцій GPS;

3 (фіксоване) - параметри референсної станції GPS;

4 (дослідне) - дані референсної станції;

5 (фіксоване) - стан супутників GPS;

6 (фіксоване) - нульовий кадр GPS;

7 (фіксоване) - альманах радіомаяків диференціальної GPS;

8 (дослідне) - альманах псевдосупутників;

9 (фіксоване) - приватні корекції GPS;

10 (зарезервоване) - диференціальні корекції P-коду;

11 (зарезервоване) - збільшення корекцій на частотах L1 і L2 (зарезервоване) - параметри станцій-псевдосупутників;

13 (дослідне) - параметри наземного передавача;

14 (дослідне) - час тижня GPS;

- 15 (дослідне) - іоносферні дані;
- 16 (фіксоване) - спеціальне повідомлення GPS;
- 17 (дослідне) - ефемериди супутників GPS;
- 18 (фіксоване) - нескореговані в реальному часі фази несучої;
- 19 (фіксоване) - нескореговані в реальному часі псевдовідстані;
- 20 (дослідне) - корекції фази несучої;
- 21 (дослідне) - високоточні корекції;
- 22 (дослідне) - розширені параметри референсної станції;
- 23...30 - не визначені;
- 31 (дослідне)-диференціальні корекції ГЛОНАСС;
- 32 (дослідне) - параметри референсної станції ГЛОНАСС;
- 33 (дослідне) - стан супутників ГЛОНАСС;
- 34 (дослідне) - приватні корекції ГЛОНАСС;
- 35 (дослідне) - альманах радіомаяків ГЛОНАСС;
- 36 (дослідне)-спеціальне повідомлення ГЛОНАСС;
- 37 (дослідне) - зсув системного часу GNSS;
- 38.. .58 - не визначені;
- 59 (фіксоване) - приватне повідомлення;

60...63 (зарезервовані) - багатоцільове використання. Повідомлення типу 1 (диференціальні корекції GPS) є процедурою першорядного значення, яка забезпечує корекцію псевдовідстані  $PRC\{t\}$  під час вимірювання часу  $t$  приймачами користувачів. Коди індикації масштабу повідомлення типу 1: 0 - масштаб корекції псевдовідстані - 0,02 м, а швидкості зміни псевдовідстані - 0,002 м/с; 1 - масштаб корекції псевдовідстані - 0,32 м, а швидкості зміни псевдовідстані - 0,032 м/с. Коди індикації параметрів UDRE: 00 - UDRE менше 1 м; 01 - UDRE від 1 до 4 м; 10 - UDRE від 4 до 8 м; 11 - UDRE більше 8 м [1].

Формат повідомлення "1" представлено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

## Формат повідомлення "1"

1	2,3	4...8		9...24	25...30
Масштаб	UDRE	Ідентифікатор супутника		Корекція псевдовідстані	Перевірні символи
1...8	9...16	17	18,19	20...24	25...30
Корекція швидкості зміни псевдовідстані	Вихідні дані	Масштаб	UDRE	Ідентифікатор супутника	Перевірні символи
1...16		17...24			25...30
Корекція псевдовідстані		Корекція швидкості зміни псевдовідстані			Перевірні символи
1...8	9	10,11	12...16	17...24	25...30
Вихідні дані	Масштаб	UDRE	Ідентифікатор супутника	Корекція псевдовідстані(більший байт)	Перевірні символи
1...8		9...16		17...24	25...30
Корекція псевдовідстані(менший байт)		Корекція швидкості зміни псевдовідстані		Ідентифікатор супутника	Перевірні символи
1...8		9...16		17...24	25...30
Корекція швидкості зміни псевдовідстані		Вихідні дані		Насичення	Перевірні символи
1...8		9...24		25...30	-
Вихідні дані		Насичення		Перевірні символи	
Параметри		Довжина параметри,біт		Роздільна здатність	Діапазон змін параметрів
Масштаб		1		-	2 стани (0 або 1)
UDRE		2		-	4 стани
Ідентифікатор супутника		5		1	1...32
Корекція псевдовідстані		16		0.02 або 0.32 м	±655.34 або ±10 485.44м
Корекція швидкості зміни псевдовідстані		8		0.002 або 0.032 м/с	±0.254 або ±4.064м/с

Вихідні дані	8	Згідно з ICD-GPS-200C[95]	
Насичення	8N (за модулем)	0;8 або 16 біт	
Перевірні символи	6N	Згідно з ICD-GPS-200C[95]	

Повідомлення типу 2 (збільшення диференціальних корекцій GPS) має формат, ідентичний формату повідомлення типу 1 і відрізняється лише змістовою частиною: корекція псевдовідстані PRC заміняється на збільшення корекції псевдовідстані PRC, а корекція швидкості зміни псевдовідстані RR C - на збільшення корекції швидкості зміни псевдовідстані RRC. Повідомлення типу 2 використовується в ситуації, коли приймач споживача не може безпосередньо декодувати нові супутникові ефемериди в даних супутника. Повідомлення можна не використовувати, якщо приймач користувача виконує негайне декодування нових ефемерид [1].

Якщо референсна станція передає повідомлення типів 1 і 2 при різному часі їх початку, використовуючи нові повідомлення навігаційних даних із супутників GPS під час розрахунку положень супутника і компенсації відхилень синхронізації супутника, то це індукується зміною параметра IOD у повідомленні типу 1, оскільки кожен новий стан супутникових навігаційних даних пов'язаний з цим параметром. Диференціальна апаратура споживача не повинна використовувати нові навігаційні дані супутника доти, доки референсна станція індукує відповідний IOD у повідомленні типу 1 [1].

Слід зазначити що всі типи даних які були розглянуті даним розділом використовуються різними за призначенням підсистемами GPS, проте мають фактичну схожість методами передавання інформації та їх типами, тому імплементація методу модернізації розглянуте в наступному розділі, теоритично може бути реалізоване й на інших сімействах GNSS.

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2**

В данному розділі було детально розглянуто особливості передавання даних у супутниковій системі навігації GPS, представлені таблиці в яких наведено типи даних які використовуються різними типами ‘користувачів’, детально розглянуті склад та функції кожного з представлених, додатково представлені деякі алгоритми застосування даної інформації(повідомлень) користувачами.



## РОЗДІЛ 3

### МОДЕРНІЗАЦІЯ КОМУНІКАЦІЙНОЇ ЛІНІЇ GPS НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

#### 3.1. Сигнал L1 – його складові та особливості.

Для розуміння запропонованої моделі удосконалення GPS, перш за все необхідно зазначити, що в даному розділі буде розглянуто комунікаційну лінію, яка представлена цивільними сигналами. Основні цивільні сигнали які використовуються на даний момент як і було зазначено раніше L1, L2 та L5. Найбільш досконалим з них є L5, перевагою якого є використання на частоті 1176.56 МГц де завади стають мінімальними або майже непомітними, використовується починаючи з 2014 року, переважно в авіаційній сфері та цивільному житті, на даний момент сузір'я супутників налічує 17 одиниць які можуть використовувати даний тип сигналу.

Сигнал L2 використовується штатно. Отже залишається L1, найстарший, залишився без значних змін, частота 1575.42 МГц, має певні недоліки пов'язані з малою потужністю та 'відбиттям' сигналу від перешкод і становить найбільший інтерес з точки зору кв.роботи. L1 використовує наступні складові: C/A (Coarse/acquisition code), P(Y) Code, M-Code (рисунок 3.1), в розробці на стадії тестування знаходиться покращена версія L1C, яка покликана збільшити ефективність та завадостійкість сигналу. Отже зупинимось більш детально на сигналі коду L1.

Код C/A — це псевдошумовий код довжиною 1023 біта (також псевдовипадкова двійкова послідовність) (код PN або PRN), який при передачі зі швидкістю 1,023 мегабіта на секунду (Мбіт/с) повторюється кожен мілісекунду. Ці послідовності збігаються або сильно корелюють лише тоді, коли вони точно вирівняні. Кожен супутник передає унікальний код PRN, який погано співвідноситься з кодом PRN будь-якого іншого супутника. Іншими словами, коди PRN дуже ортогональні один одному. Це форма множинного доступу з кодовим розділенням (CDMA), яка дозволяє приймачу розпізнавати кілька супутників на одній частоті [12].

P-код також є PRN, однак код PRN кожного супутника має розмір  $6,1871 \times 10^{12}$  біт (6 187 100 000 000 біт) і повторюється лише раз на тиждень (він передається зі швидкістю 10,23 Мбіт/с). Надзвичайна довжина P-коду збільшує його коефіцієнт кореляції та усуває будь-яку неоднозначність діапазону в межах Сонячної системи. Однак код настільки довгий і складний, що вважалося, що приймач не може безпосередньо отримати та синхронізувати лише цей сигнал. Очікувалося, що приймач спочатку зафіксується на відносно простому коді C/A, а потім, після отримання поточного часу та приблизної позиції, синхронізується з P-кодом.

У той час як C/A PRN є унікальними для кожного супутника, P-код PRN насправді є невеликим сегментом головного P-коду приблизно  $2,35 \times 10^{14}$  біт завдовжки (235 000 000 000 000 біт), і кожен супутник повторно передає призначений йому сегмент головного коду [12].

Щоб запобігти неавторизованим користувачам від використання або потенційного втручання у військовий сигнал через процес під назвою спуфінг, було вирішено зашифрувати P-код. З цією метою P-код був промодульований W-кодом, спеціальною послідовністю шифрування, щоб створити Y-код. Y-код – це те, що супутники передають після того, як модуль захисту від спуфінгу було встановлено у стан “увімкнено”. Зашифрований сигнал називається P(Y)-кодом [12].

Окрім кодів діапазону PRN, приймач повинен знати детальну інформацію про положення кожного супутника та мережу. Конструкція GPS містить цю інформацію, модульовану поверх кодів визначення дальності C/A та P(Y) зі швидкістю 50 біт/с, і це називається навігаційним повідомленням [12].

Навігаційне повідомлення складається з трьох основних компонентів. Перша частина містить дату й час GPS, а також статус супутника та вказівку його працездатності. Друга частина містить орбітальну інформацію, яка називається даними ефемерид, і дозволяє приймачу обчислити положення супутника. Третя частина, яка називається альманах, містить інформацію та статус усіх супутників; їх місцезнаходження та номери PRN. У той час як ефемеридна інформація дуже детальна і вважається дійсною протягом не більше чотирьох годин, інформація альманаху є більш загальною і вважається дійсною протягом 180 днів. Альманах допомагає

приймачу визначити, які супутники шукати, і коли приймач приймає сигнал кожного супутника по черзі, він завантажує дані ефемерид безпосередньо з цього супутника. Визначення положення за допомогою будь-якого супутника не може бути обчислено, доки приймач не матиме точну та повну копію даних ефемерид цього супутника. Саме навігаційне повідомлення складається з кадру довжиною 1500 біт, який розділений на п'ять підкадрів по 300 біт кожен і передається зі швидкістю 50 біт/с (тому для передачі кожного підкадру потрібно 6 секунд). Субфрейм 1 містить дату й час GPS, а також статус і стан супутника. Підкадри 2 і 3, коли вони об'єднані, містять ефемеридні дані супутника-передавача. Субфрейми 4 і 5, об'єднані, містять 1/25 частину альманаху; тобто для завершення 15 000-бітного повідомлення альманаху потрібно 25 кадрів. З такою швидкістю для отримання всього альманаху з одного супутника потрібно 12,5 хвилин [12].

Використовувані сигнали несучої та інформаційної складової представлені на рис 3.1.

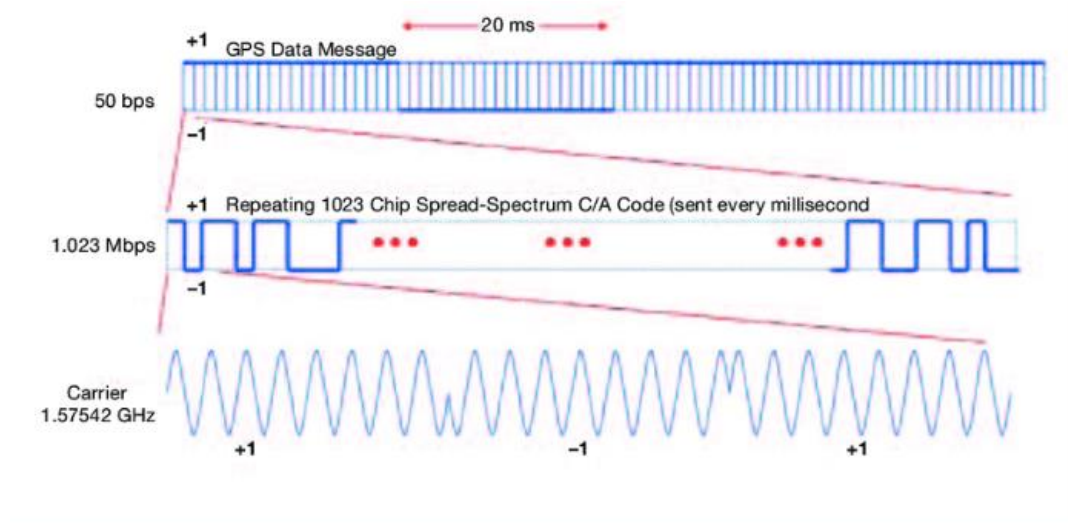


Рис. 3.1. Спектр сигналу - L1 band

### 3.1.1. Деталі порівняних модуляцій

При багатопозиційній фазовій модуляції (англ. PSK – Phase Shift Keying) відповідно до послідовності бітів, що передаються дискретно змінюється фаза коливань сигналу-носія інформації. Амплітуда та несуча частота коливань при цьому не змінюються. Багатопозиційну фазову модуляцію сьогодні найчастіше позначають

як M-PSK (англ. позначення), або ФМ-М (укр. позначення) де М – число, що показує кількість можливих дискретних значень зсуву фази. Число М може приймати значення  $M = 2^n$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Модуляцію 2-PSK, як правило, позначають BPSK – Binary Phase Shift Keying (бінарна фазова модуляція). Стани сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією при геометричному представленні сигналів показують за допомогою сигнальних сузір'їв (рисунок 3.2), на яких сигнальними векторами, що сполучають початок координат та сигнальні точки показують можливі фазові зсуви (в загальному випадку – стани). Для підвищення завадостійкості стани сигналу кодують у кодї Грея [3].

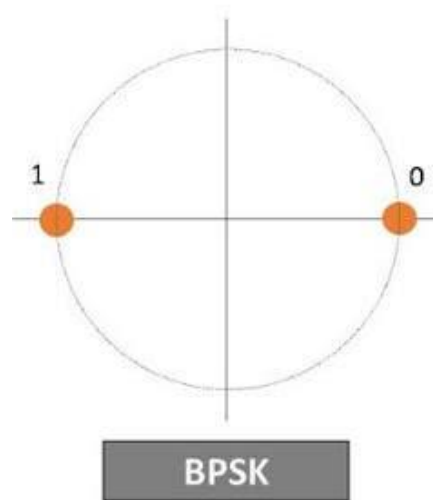


Рис. 3.2. Сузір'я BPSK

Формування сигналів PSK у передавальному пристрої цифрової системи зв'язку відбувається шляхом складання нормованих за амплітудою ортогональних синфазної  $\sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0)$  та квадратурної  $\cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0)$  компонент [3].

Можливість використовувати алфавіт з кількістю позицій  $N \geq 3$  дає змогу реалізувати високоосновну (на відміну від бінарної) маніпуляцію (багато-позиційну маніпуляцію). При квадратурній амплітудній модуляції QAM – (Quadrature Amplitude Modulation) змінюються параметри коливань носіїв інформації – фаза і амплітуда відповідно до послідовності бітів. Квадратурне подання сигналів є досить універсальним засобом їх опису. Квадратурне подання полягає у виразі лінійного

коливання комбінацією двох ортогональних складових – синусоїдальної та косинусоїдальної, формула(1):

$$Z(t) = x(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) + y(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1)$$

При геометричній трактовці кожен сигнал QAM можна зображувати в сигнальному просторі вектором. Кінцівки векторів дають зображення у вигляді сигнальних точок. Координати цих точок визначаються значеннями  $x(t)$  та  $y(t)$ . Сукупність сигнальних точок утворює сигнальне сузір'я(рисунок 3.3).Оскільки методи QAM потребують досить високих вимог щодо стабільності амплітуди і частоти сигналів, їх найбільше використовують у стаціонарних модемних каналах зв'язку [5].

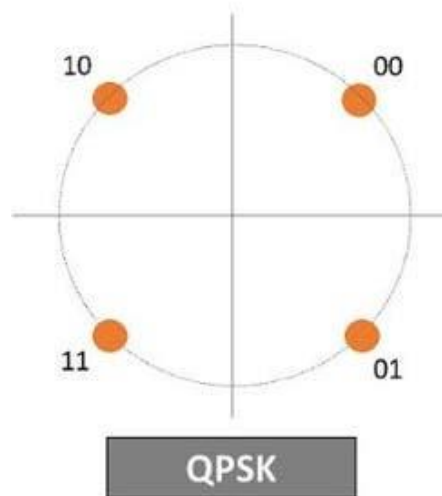


Рис. 3.3. Сузір'я QPSK

На данний момент модуляція QPSK, вже використовується в супутникових системах як засіб передачі відео сигналів типу MPEG 2. Як приклад можна навести індійську супутникову систему IRSS – Indian Remote Sensing System, яка налічує 11 операційних супутників, використовується для збору даних та орбітальних досліджень які дозволять в подальшому створювати більш технологічні безпроводні мережі.

### 3.1.2. Модуляції A-QPSK/A-BPSK

При розгляді варіантів удосконалення системи можна звернути увагу на існуючі різновиди модуляцій які призначені для авіаційної сфери діяльності A-BPSK, A-QPSK. Для каналів радіозв'язку AMSS матеріалами ITU і ICAO рекомендовано використовувати два види фазової модуляції. Це авіаційна бінарна ФМ (A-BPSK) та авіаційна квадратурна ФМ (A-QPSK). Метод A-BPSK використовується при швидкостях передавання по каналу до 2,4 кбіт/с (тобто 0,6; 1,2 та 2,4 кбіт/с). При цьому забезпечується більш висока стійкість відносно фазового шуму, який виникає в процесі перетворення часто на станції AES, на супутнику і на станції GES. При швидкостях, більших ніж 2,4 кбіт/с, вплив фазового шуму на процес демодуляції зменшується і більш важливим стає збереження смуги частот при високих швидкостях передавання. Тому у цьому випадку використовується чотирикратна ФМ – A-QPSK. Метод A-BPSK є особливим видом ФМ маніпуляції з формуючими фільтрами, які спеціально налагоджені на використання в радіоканалах з завмираннями. Від звичайної бінарної ФМ метод A-BPSK відрізняється тим, що логічний “0” співвідноситься з фазовим зсувом на  $(-90^\circ)$ , а логічна “1” – з фазовим зсувом на  $(+90^\circ)$ . Це вимагає попереднього диференційного кодування потоку даних. Метод A-QPSK являє собою варіант модуляції QPSK. Кодер даних при A-QPSK комутує вхідну послідовність бітів  $\{a_i\}$ , яка подається зі швидкістю  $2/T$ . “Парні” біти передаються в лінію I, а “непарні” біти – в лінію Q. Виникає два потоки даних зі швидкістю  $1/T$  кожний. Синхронні сканери S працюють із швидкістю  $1/T$  і генерують ідеальні біполярні імпульси залежно від значимості бітів даних – “1” або “0” [5].

### ***3.1.3. Модуляція OQPSK – Offset Quadrature Phase Shift Keying.***

OQPSK, офсетна QPSK або ОКQPSK (зміщена маніпуляція QPSK), також відома як SQPSK (ступінчаста QPSK), є модифікованим різновидом QPSK. В OQPSK значення каналів Q та I не змінюється одночасно, оскільки значення основної смуги Q-каналу затримується на тривалість одного символу. Використовуючи цю властивість, сигнали OQPSK забезпечують зменшення нелінійних спотворень при проходженні через нелінійний елемент. Таким чином, у цьому випадку можна очікувати кращої продуктивності в нелінійних космічних супутникових лініях у порівнянні з QPSK. У системах OQPSK максимальна зміна фази обмежена  $90^\circ$ . Це одна з причин, чому OQPSK вигідний для супутникових каналів і використовується в супутникових лініях.

Беручи до уваги деталі щодо заміщення в рамках модернізації, використовуваної нині BPSK та пропонованої QAM(QPSK), слід зазначити що будь-яка модуляція не є ідеальною з точки зору технічної реалізації і як у будь-яких інших має свої недоліки та переваги. У мобільному супутниковому зв'язку найбільш часто використовуваною цифровою системою модуляції є BPSK і різні форми QPSK. Модуляція вищого порядку забезпечує кращу продуктивність і ефективність, але вона більш чутлива до інтерференції каналу.

## **3.2. Пропонований метод модуляції**

Основна ідея запропонованого методу: на даний момент в системі GPS передаються навігаційні дані (дані про стан супутникової системи, положення супутників – альманахи, ефемериди, тощо...) з швидкістю 50 біт/с. При цьому використовується модуляція BPSK (одна фаза - стан сигналу переносить 1 біт). Мій вибір – використання модуляції QPSK (вона ж QAM-4), при якій одна фаза – стан сигналу дозволяє транслювати 2 інформаційні біти. Це дозволить або збільшити швидкість передавання даних у два рази у тій самій смузі частот (до 100 біт/с) і, як наслідок, вдвічі скоротити час запуску навігаційного приймача, або зменшити в два рази ширину смуги частот при тій самій швидкості передавання навігаційних даних.

Для реалізації данного методу,був використаний метод моделювання сигналів в програмному середовищі MathCad:

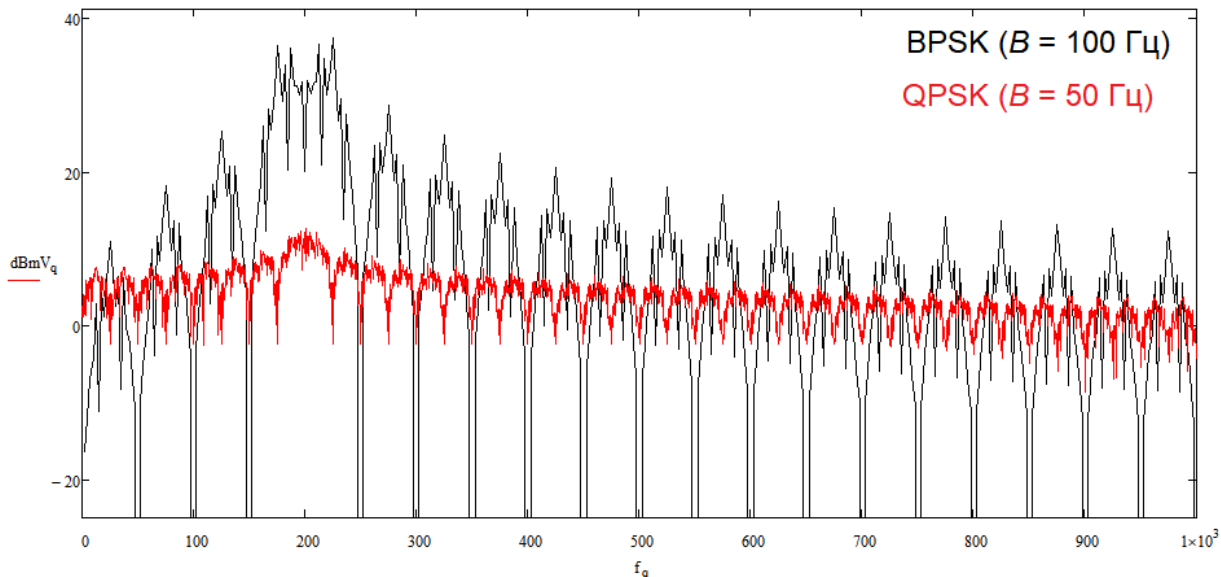


Рис. 3.4. Кінцевий результат моделювання сигналів

Результатом проведеного моделювання можна виділити такі пункти:

1. Змодельовані графіки,які відображають наочність різниці між перевагами та недоліками порівнюваних модуляцій сигналів(рисунок 3.4).
2. Запропонований метод використання QPSK добре узгоджується з системою,не потребує її суттєвих змін,при цьому підвищує спектральну ефективність передавання інформаційної складової у 2 рази.

### **3.2.1. Використання модулятора**

Як варіант пропонується використовувати вже наявні в супутникових системах модулятори.Представлена схема на рис. 3.5,модулятора QPSK використовується індійською супутниковою системою IRSS.



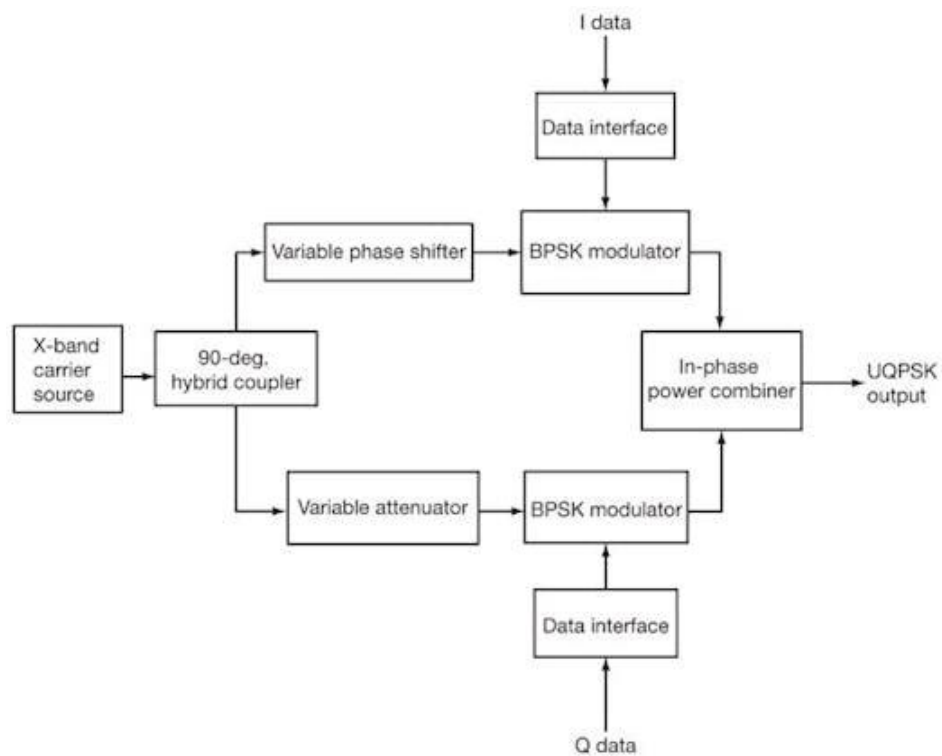


Рис. 3.5. Схема пропонованого модулятора, (первісно призначення якого є індійська IRNSS) для тестового використання в комплексі GPS.

В одному з таких підходів модуляція квадратурної фазової маніпуляції (QPSK) забезпечує як спектральну, так і енергетичну ефективність. У модуляторі QPSK два потоки даних одночасно модулюють несучий сигнал. Для оптимального використання доступної супутникової потужності часто використовується незбалансований модулятор QPSK (UQPSK). Модулятор UQPSK був реалізований за допомогою 3-дБ/90-градусного розгалужувача, двох подвійних збалансованих змішувачів, фазоперетворювача, атенюатора та синфазного суматора потужності. На рис. 3.6 показано графік даних I та Q разом із змодельованим спектром UQPSK [4].

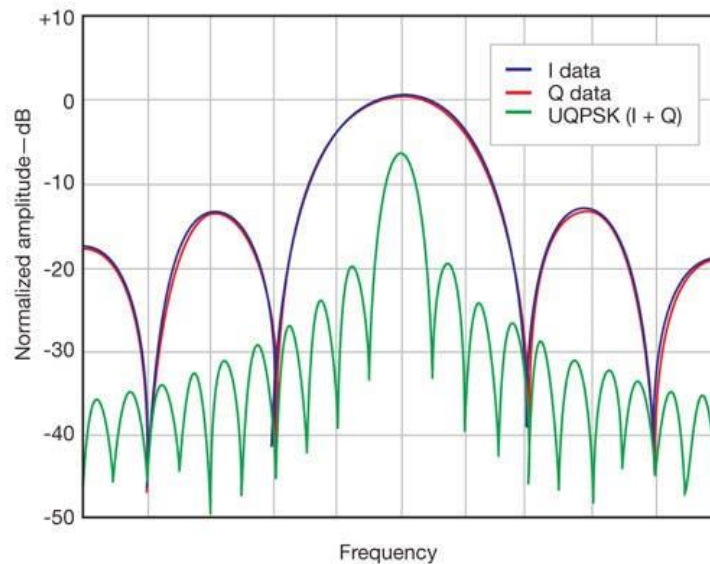


Рис. 3.6. зображено графіки I та Q інформаційних складових з симуляцією спектру UQPSK.

Джерелом несучої для модулятора служив діелектричний резонаторний генератор (DRO), що генерує несучий сигнал на частоті 8725 МГц. У демонстраційних цілях для модуляції несучого сигналу використовувалися імпульсний потік 50 кбіт/с. Генератор даних, що забезпечує різні бітрейти (окрім цієї швидкості), був недоступний. Використання двох різних генераторів даних вимагатиме, щоб дані були синхронізовані з годинником. Модульовані сигнали BPSK подавали на синфазний суматор потужності для отримання модульованого вихідного сигналу UQPSK, показаного на рис. 3.7 [4].

Оскільки на робочому місці не було стандартного обладнання демодулятора UQPSK, модульовані дані були відновлені, як показано на рис. 3.8. У цьому експерименті два потоки даних були згенеровані одним генератором. Дані зі швидкістю 200 Кбіт/с були взяті з генератора та розділені на чотири за допомогою тригерів JK для генерації даних 50 Кбіт/с. Два потоки даних однополярного формату були перетворені в біполярний формат за допомогою схеми перетворювача транзисторного рівня. Дані I та похідні дані Q показані на рис. 3.7 [4].

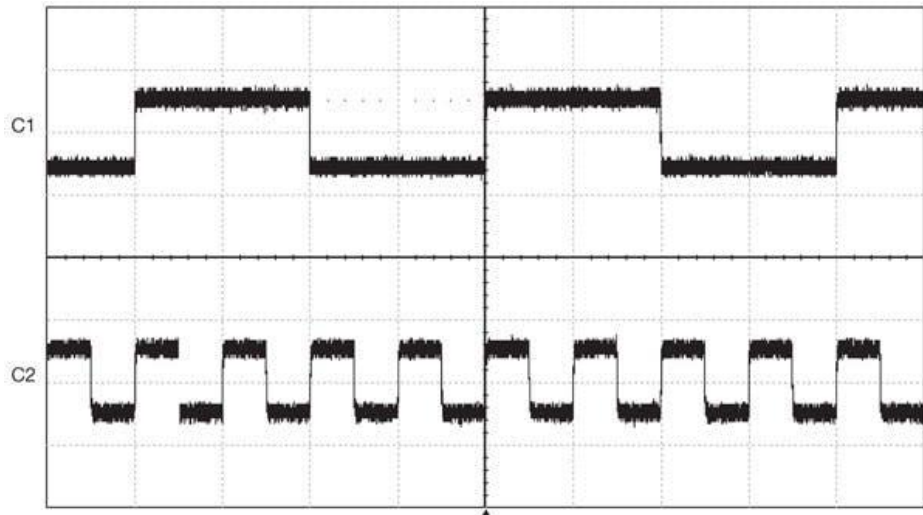


Рис. 3.7. I та Q інформаційні складові які застосовують в UQPSK модуляторі.

Потоки даних подавали на модулятор UQPSK. Потім ці два несучі сигнали модулювали даними I та Q (рисунки 3.8 та 3.9) за допомогою змішувачів з подвійним балансом (модель змішувача DML-2B-10G від Merrimac Industries). [4].

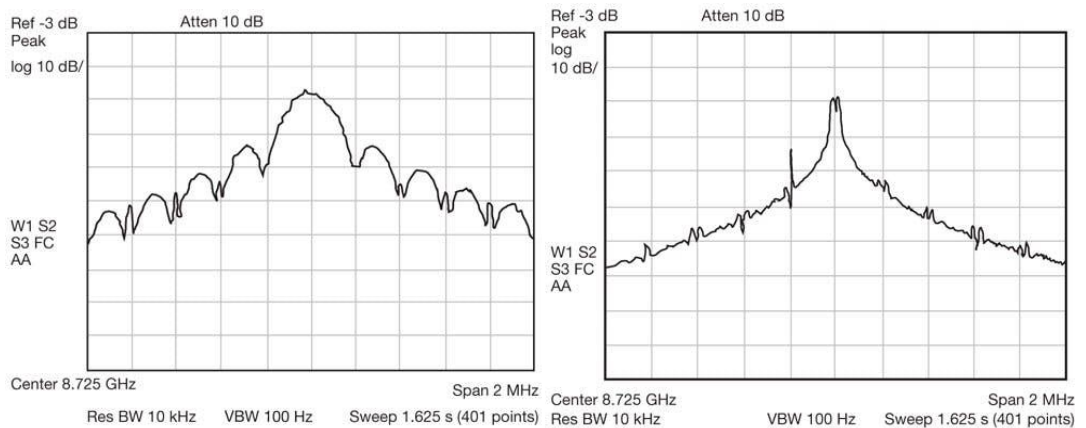


Рис. 3.8. Змодульовані сигнали I та Q, модулятора UQPSK

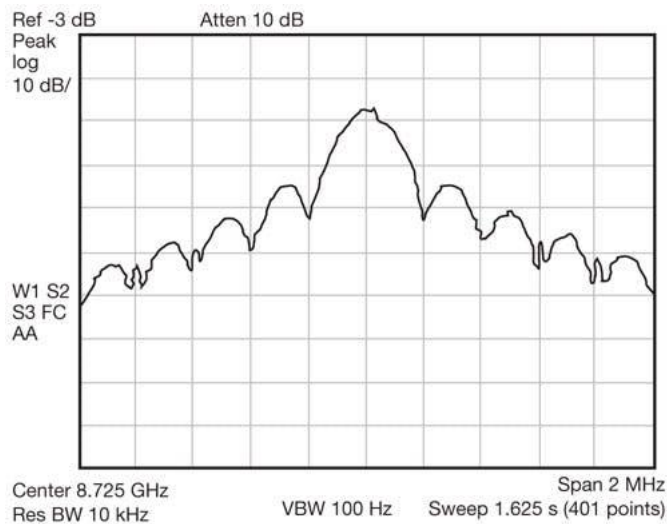


Рис. 3.9. Модульований методом BPSK сигнал, який подавався на синфазний об'єднувач потужності для отримання UQPSK-модульованого вихідного сигналу.

Для отримання двох виходів несучих від DRO використовувався модуль дільника потужності, (рис. 3.10). Один із виходів дільника потужності подавався як вхід на модулятор UQPSK. Вихід, модульований UQPSK, і інший вихід несучої DRO з дільника потужності подавалися на змішувач, щоб повернути вихідні модульовані дані. Коли фаза несучої була синхронізована з несучою I-каналу сигналу UQPSK, I-потік даних був демодульований [4].

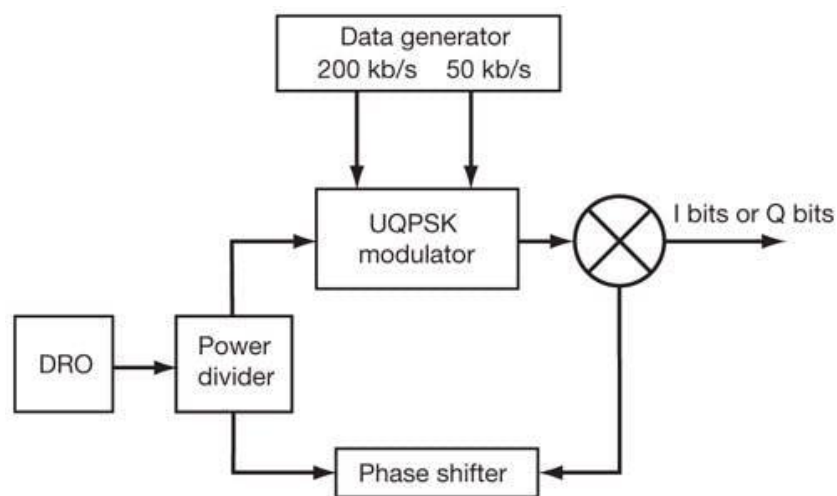


Рис. 3.10. Ця блок-схема детально описує різні функції, які містяться в тестовій установці модулятора/демодулятора.

При зсуві фази носія на 90 град. використовуючи змінний фазообертач, потік даних Q був демодульований. Таким чином, змінюючи фазу фазообертача, потоки даних I і Q можуть бути демодульовані; результуючі хвилі цього процесу показані на рис. 3.11 [4].

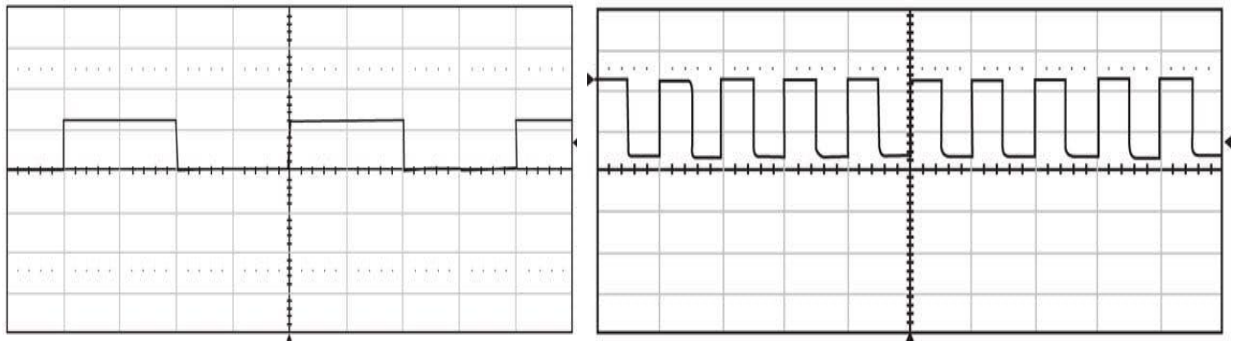


Рис. 3.11. Демодульовані інформаційні складові Q та I, за допомогою фазового зсуву.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Підводячи підсумки: Було продемонстровано незбалансований модулятор QPSK. Це варіант стандартного модулятора QPSK. Цей незбалансований модулятор QPSK корисний для передачі різних (нерівних) швидкостей передачі даних від двох різних супутникових корисних навантажень, забезпечуючи ефективне використання бортової потужності. Крім того, було представлено пристрій для демодуляції даних, та проведено моделювання сигналу за допомогою програмного середовища MathCad, в наведених графіках відображено дві модуляції BPSK та QPSK, порівнюючи ці два графіки, дійшли до висновку що квадратурна фазова модуляція відповідає поставленій меті, а саме збільшення пропускної можливості від наявних 1 біт/с до 2 біт/с.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи були надані загальні дані про систему, її роль та задачі, проаналізовано та досліджено матеріали пов'язані з тематикою, базуючись на матеріалах яких було проведено подальше прикладне дослідження.

Виконання кваліфікаційної роботи передбачало собою окреслення області або сегментів як об'єктів дослідження.

Визначено основні сегменти такі як Супутникова, Наземна та окрема найважливіша для подальших дій – Комунікаційна лінія, детально та інформативно розписано особливості та експлуатаційні характеристики.

В даній роботі було досліджено роботу комунікаційної лінії яка являє собою сукупність різних рівнів, складових та сегментів.

На основі даних та матеріалів, запропоновано власний варіант модернізації, який передбачає заміну модуляції найбільш перспективну. Запропонований метод модуляції був реалізований в вигляді рекомендації по використанню модулятора та моделювання сигналу з подальшим виведенням кінцевого результату.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Супутникова радіонавігація Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П. Супутникова радіонавігація. - К.: Техніка, 2004. - 328 с.; іл. - Бібліогр.: с. 320-325. ISBN 966-575-056-9.
2. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/BPSK-vs-QPSK.html> BPSK vs QPSK-Difference between BPSK and QPSK.
3. <https://ee3550-gps.weebly.com/transmission-of-gps-signals.html> - The Transmission of GPS Signals.
4. <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21844831/qpsk-modulator-transmits-satcom-data> - A novel modulator helps achieve improved transmission efficiency in satcom systems with uneven data payloads. Dr. D. Venkata Ramana and Jolie R. Nov. 28, 2012.
5. Харченко В.П. та ін. Супутникові системи авіаційного зв'язку Супутникові системи авіаційного зв'язку: Навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2003. – 188 с. ISBN 5-88405-013-5.
6. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/gps.html> GPS III/IIIF The New Generation of Positioning, Navigation and Timing 2023
7. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations> Space Segment June 28, 2022.
8. <https://www.gps.gov/systems/gps/control/OCX/> Next Generation Operational Control System(OCX) December 9, 2021.
9. <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/> New Civil Signals August 10, 2020.
10. <https://www.gps.gov/applications/> GPS Applications November 25, 2014.
11. [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/te chops/navservices/gnss/gps/howitworks](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/te chops/navservices/gnss/gps/howitworks)
12. <http://geoconnect.com.au/gps-signals-11-12-15/>