

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри

_____ Володимир ШУТКО

“ _____ ” _____ 2022 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»**

**Тема: _____ «Антенна система для безпілотних літальних апаратів.
Програмна частина (комплексна тема)» _____**

Виконавець: _____ Ф. О. КАТУШОНОК

Керівник: _____ О. А. ЩЕРБИНА

Консультант розділу «Охорона праці» _____ О.О. КОЗЛІТІН

**Консультант розділу «Охорона
навколишнього середовища» _____ М.М. РАДОМСЬКА**

Нормоконтролер: _____ Р.Б. СІНІЦІН

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей

Освітньо-професійна програма «Електронні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ШУТКО

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

КАТУШОНОК Федір Олександрович

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

1. Тема дипломної роботи (проекту): «Антенна система для безпілотних літальних апаратів. Програмна частина (комплексна тема)»

затверджена наказом ректора від «09» вересня 2022 р. № 1351/ст.

2. Термін виконання роботи (проекту): 19.09.2022 р. по 23.11.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): принципи побудови систем зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

4. Зміст пояснювальної записки: огляд структур антенних систем, протоколів та стандартів модуляції для безпілотних літальних апаратів, основи побудови каналів зв'язку з безпілотними літальними апаратами, розробка програмного забезпечення для антенної системи, охорона праці, охорона навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, рисунки, графіки.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Аналітичний огляд літературних джерел зі структур антенних систем, протоколів та стандартів модуляції для безпілотних літальних апаратів	19.09-29.09	Виконано
2	Основи побудови каналів зв'язку з безпілотними літальними апаратами	30.09-10.10	Виконано
3	Математична модель обраної антенної системи	11.10-21.10	Виконано
4	Програмна реалізація антенної системи	22.10-07.11	Виконано
5	Охорона праці	08.11-11.11	Виконано
6	Охорона навколишнього середовища	12.11-17.11	Виконано
7	Висновки	18.11-20.11	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	21.11-23.11	Виконано

7. Консультація з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	ст. в. Козлітін О.О.		
Охорона навколишнього середовища	доц., к.т.н. Радомська М.М.		

Радомська Маргарита Мирославівна (доцент, к.т.н.)

8. Дата видачі завдання: “ 19 ” вересня 2022 р

Керівник дипломної роботи (проекту) _____
(підпис керівника)

Ольга ЩЕРБИНА
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Федір КАТУШОНОК
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Антенна система для безпілотних літальних апаратів. Програмна частина (комплексна тема)»: сторінок – 118, рисунків – 63, таблиць – 8, джерел посилань – 28.

Об'єкт дослідження: процес організації зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

Мета роботи: дослідження принципів побудови програмного забезпечення антенної системи для зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

Проведена робота по розробці програмного забезпечення антенної системи для зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

Ключові слова: антени для зв'язку з безпілотними літальними апаратами для наземного сегменту, антенні решітки, пеленгування сигналу, протоколи та стандарти модуляції

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ОГЛЯД СТРУКТУР АНТЕННИХ СИСТЕМ, ПРОТОКОЛІВ ТА СТАНДАРТИВ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	10
1.1. Типи безпілотних літальних апаратів.....	10
1.2. Антени та антенні системи для зв'язку з безпілотними літальними апаратами.....	16
1.3. Параметри антен для безпілотних літальних апаратів.....	19
1.4. Протоколи та стандарти модуляції.....	23
РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ПОБУДОВИ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ.....	40
2.1. Протоколи та інтерфейси з'єднань у системах мікроконтролерів.....	40
2.2. Огляд параметрів мікроконтролерів для зв'язку з безпілотними літальними апаратами.....	76
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ.....	79
3.1. Математична модель обраної антенної системи	79
3.2. Програмна реалізація антенної системи.....	84
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	96
4.1. Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів у робочій Зоні.....	96
4.2. Технічні заходи для зменшення впливу шкідливих факторів.....	97
4.3. Пожежна безпека.....	101
4.4. Інструкція з техніки безпеки, пожежної та вибухової безпеки.....	103
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	
ВИСНОВКИ.....	104
5.1. Вплив БПЛА на тварин.....	104
5.2. Дія шуму на живі організми.....	105

5.3. Вплив електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону на тварин.....	109
5.4. Способи захисту від шуму та електромагнітного випромінювання.....	112
5.5. Висновок.....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЖЕРЕЛ.....	115

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ДС – діаграма спрямованості;

ФАР – фазована антенна решітка;

ХС – характеристика спрямованості;

SoC – System on Chip

IC – Integrated Circuit

FPGA – Field Programmed Gate Array

OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying

GFSK – Gaussian Frequency-shiftkeying

ВСТУП

У сучасному світі, дедалі більше використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони використовуються у дуже багатьох сферах життєдіяльності людини, від цивільних до військових потреб. Безпілотні літальні апарати у 2022 році грають дуже значну роль у допомозі людству та автоматизації багатьох процесів, і з високою вірогідністю будуть набирати дедалі більшу популярність у найближче десятиріччя. За допомогою безпілотних літальних апаратів здійснюються доставки посилок та невеликих вантажів, проводяться фото та відеозйомки, змагання по управлінню, задачі для аграрної промисловості по моніторингу та експедиції землегосподарств та контроль їх ефективності та рослинності, задачі аеророзвідки, радіомоніторингу та різні задачі військового призначення, включаючи використання вогнепальної зброї або комплексів керованих ракет.

Одна з основних проблем при розробці БПЛА є питання стабільного, надійного та захищеного радіозв'язку, що спроможний передавати необхідну кількість даних в одиницю часу. Враховуючи специфіку використання деяких БПЛА, дуже часто взаємодія з ними відбувається на великих дистанціях, з великою кількістю перешкод, у складній метеорологічній ситуації або в умовах сильних електромагнітних завад.

Для вирішення цих питань БПЛА на сьогоднішній день містять в собі величезну кількість різноманітної електроніки, серцем якої є бортовий контролер, та різноманітне радіообладнання для зв'язку з наземним сегментом.

Також, усі важливі параметри зв'язку залежать не тільки від параметрів бортового обладнання БПЛА, а й також від характеристик керуючої, найчастіше наземної частини.

Таким чином, задача вдосконалення та модернізації радіоапаратури БПЛА є досить комплексною, і повинна розглядатись як з позиції самого літального апарату, так і з точки зору керуючого обладнання.

Актуальність даної дипломної роботи полягає в тому, що вона присвячена проектуванню адаптивної антенної системи, що підлаштовує положення апертури антени у просторі під фактичне положення джерела радіосигналу, у даному випадку

БПЛА, за допомогою електромеханічного пристрою, що може змінювати меридіональний та азимутальний кут. При цьому повинна зберігатись досить висока ступінь завадостійкості та пропускна здатність сигналу для передачі поточного відео (з бітрейтом у як мінімум 1.5 Мб/с) на частоті 5.8 ГГц.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТРУКТУР АНТЕННИХ СИСТЕМ, ПРОТОКОЛІВ ТА СТАНДАРТІВ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Майже всі БПЛА використовують антени для організації дистанційного зв'язку з різними цілями, наприклад, керування апаратом та передачі необхідної інформації. У даному розділі буде розглянуто використання різних антенних систем у різних типах БПЛА.

1.1. Типи безпілотних літальних апаратів

На сьогоднішній день БПЛА використовуються у дуже багатьох галузях. Найчастіше, їх використовують у ситуаціях, коли дуже важливою є автономність, мала помітність, можливість керуватись віддалено або працювати у екстремальних умовах, які є суттєво шкідливими для людини. Найбільш поширені галузі використання є:

1) Військові БПЛА. Сили оборони в усьому світі все частіше використовують БПЛА для різноманітних завдань, таких як спостереження, логістика, зв'язок, високоточні удари і бойові дії. Станом на 2020 рік, сімнадцять країн мали на озброєнні БПЛА, а понад 100 країн використовували БПЛА для військових потреб. На світовому ринку військових БПЛА домінують компанії зі Сполучених Штатів, Туреччини, Китаю, Ізраїлю та Ірану. Для розвідувальних місій властива мала помітність орнітоптерів мікро-БПЛА з махаючими крилами, які імітують птахів або комах, що дає великий потенціал для прихованого спостереження та робить їх важкими цілями для збиття [1].

Безпілотний бойовий літальний апарат (ББЛА абоUCAV – unmanned combataerial vehicle) — це БПЛА, який використовується для розвідки, спостереження, захоплення цілей і розвідки та несе авіаційні боєприпаси, такі як ракети, ПТУР та/або бомби в точках підкріплення для ударів безпілотників (рис.1.1). Ці БПЛА зазвичай знаходяться під керуванням людини в реальному часі з різними рівнями автономності. На відміну від БПЛА спостереження та розвідки, такі ББЛА використовуються як для ударів безпілотників, так і для розвідки на полі бою. Літаки цього типу не мають людини-пілота на борту. Оскільки оператор керує транспортним засобом із віддаленого терміналу, то обладнання, яке необхідне для пілота-людини, не потрібне, що призводить до меншої ваги та розміру, ніж у пілотованого літака.



Рис.1.1. Baykar Bayraktar TB2 ВПС України, озброєний навігаційними бомбами МАМ-Л та дві наземні станції управління на задньому плані [2]

БПЛА спостереження та розвідки — це військовий апарат без озброєння, який використовується для розвідки, спостереження, захоплення цілей і розвідки (рис.1.2). На відміну від ББЛА, цей тип системи не призначений для перенесення авіаційних боєприпасів, таких як ракети, ПТУР або бомби для ударів. Основна його мета — надавати розвідувальні дані на полі бою.



Рис. 1.2. MQ-9 Reaper ВПС США під час навчальної місії [3]

Мініатюрний БПЛА, малий БПЛА (SUAV) або дрон – БПЛА, достатньо малий, щоб бути переносним. Найменші БПЛА називають мікроповітряними транспортними засобами (рис.1.3). Мініатюрні БПЛА варіюються від мікроповітряних апаратів (MAV), які може носити піхотинець, до переносних БПЛА, які можна носити та запускати, як піхотні переносні системи протиповітряної оборони. Цей термін зазвичай застосовується до тих, що використовуються у військових цілях. Національні регулюючі органи дають різні визначення для таких малих БПЛА, часто не вказуючи точні розміри та специфікацію вимірювання ваги.



Рис.1.3. Виготовлені в Ізраїлі БПЛА ElbitHermes 900 і ElbitHermes 450, які використовуються для розвідки та спостереження [4]

Мікроповітряний транспортний засіб (MAV) або мікроповітряний апарат — це клас мініатюрних БПЛА, які мають обмеження за розміром і можуть бути автономними (рис.1.4 та рис 1.5). Сучасні екземпляри можуть мати розміри лише 5 см. Напрямок розвитку таких БПЛА залежить від комерційних, дослідницьких, урядових та військових цілей. Таке мале повітряне судно дозволяє дистанційно спостерігати за небезпечними середовищами, недоступними для наземних транспортних засобів. Окрім військового використання, MAV були створені для хобі, таких як змагання з повітряної робототехніки та аерофотозйомка.



Рис. 1.4. Міні БПЛА Bayraktar сухопутних військ Туреччини [5]



Рис. 1.5. Мікро БПЛА Black Hornet Nano [6]

Дрон-мішень – це БПЛА, як правило з дистанційним керуванням, який зазвичай використовується для навчання екіпажів зенітних установок. Одним із найперших таких БПЛА був британський DH.82 Queen Bee, варіант навчально-тренувального літака Tiger Moth, що експлуатувався з 1935 року. Його назва призвела до нинішнього терміну «дрон». У своїй найпростішій формі дрони-мішені часто нагадують радіокеровані моделі літаків (рис.1.6). Більш сучасні дрони можуть використовувати засоби протидії, радары та подібні системи для імітації пілотованих літаків.



Рис.1.6. Реактивний БПЛА Ryan BQM-34 Firebee, який використовується як дрон-мішень [7]

2) Цивільні БПЛА. Цивільний ринок БПЛА відносно новий порівняно з військовим. Компанії з'являються як у розвинених країнах, так і у країнах, що розвиваються. Багато стартапів на ранніх стадіях отримують підтримку та фінансування від інвесторів, як у Сполучених Штатах, так і від державних установ, як у випадку з Індією. Деякі університети пропонують дослідницькі та навчальні програми чи ступені. Приватні організації також пропонують онлайніві та особисті навчальні програми для рекреаційного та комерційного використання БПЛА. Для цивільних потреб, дрони найчастіше використовуються у якості дронів доставки. Дрон доставки – це БПЛА, який використовується для транспортування пакунків,

медичних товарів, продуктів харчування чи інших товарів. БПЛА для доставки, як правило, автономні.

3) БПЛА Аерофотозйомки. Безпілотники ідеально підходять для виконання повітряних знімків для фотографів та кінематографів та широко використовуються для цієї мети. Маленькі безпілотники не потребують точної координації між пілотом і оператором, оскільки одна і та ж особа виконує обидві ролі. Однак у великих дронах з професійними кінокамерами зазвичай є пілот дрона та оператор, який контролює кут камери та об'єктив. Наприклад, дроном AERIGON, який використовується для зйомок фільмів, керують 2 людини. Безпілотники забезпечують доступ до небезпечних, віддалених або іншим чином недоступних місць.

4) Сільське та лісове господарство. Оскільки світовий попит на виробництво продуктів харчування зростає в геометричній прогресії, ресурси виснажуються, сільськогосподарські угіддя скорочуються, а робочої сили в сільському господарстві дедалі більше не вистачає, існує нагальна потреба в більш зручних і розумніших сільськогосподарських рішеннях, ніж традиційні методи. Потреба в більш розвиненій індустрії сільськогосподарських дронів і робототехніки є гострою, тому очікується її зріст. Сільськогосподарські БПЛА використовувалися в таких регіонах, як Африка, щоб допомогти розвивати сільське господарство. Також досліджується використання БПЛА для виявлення та боротьби з лісовими пожежами, чи то шляхом спостереження, чи то через запуск піротехнічних пристроїв для виклику зворотних пожеж.

5) Правоохоронне застосування. БПЛА використовуються для потреб поліції в різних країнах світу з середини 2000-х років. Їх привабливість пояснюється їх невеликими розмірами, відсутністю екіпажу та нижчою вартістю порівняно з поліцейськими гелікоптерами. БПЛА можуть використовуватися для пошуково-рятувальних операцій, повітряного патрулювання та інших завдань, які зазвичай виконують поліцейські літаки з екіпажем. БПЛА можуть бути потужними інструментами спостереження, оскільки мають системи камер, здатні сканувати номерні знаки, та тепловізори, а також радіообладнання та інші датчики.

Незважаючи на те, що переважна більшість БПЛА правоохоронних органів не озброєні, документи, отримані групою цифрових прав Electronic Frontier Foundation, вказують на те, що митна та прикордонна служба США розглядає можливість озброїти свої БПЛА «несмертельною зброєю, призначеною для знерухомилення» цілей.

1.2. Антени та антенні системи для зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

Безпілотники, квадрокоптери чи БПЛА неможливо уявити без антен. Для успішної роботи розважальних, промислових або військових дронів потужність сигналу є найважливішим фактором. Для досягнення найкращих результатів розроблені різні специфічні антени, і це неможливо уявити без комп'ютерного моделювання.

Для зв'язку з БПЛА використовувати передавальні та приймальні антени як на бортовому, так і на наземному сегменті. Типи антен, які найбільш широко використовуються для цих цілей:

1. Дротові антени (дипольна, монопольна, спіральна, рамкова антени).
2. Дзеркальні антени (параболічна антена, кутниковий відбивач).
3. Лінзові антени.
4. Мікросмужкові антени (прямокутна мікросмужкова антена).
5. Антенні решітки (антена Уда-Ягі, логоперіодична антена еквідистантні рівноамплітудні антенні решітки, скануючі антенні решітки)

Приклад типової топології радіо-взаємодії між різними антенами, які використовуються для систем зв'язку з БПЛА показано на рис.1.7.

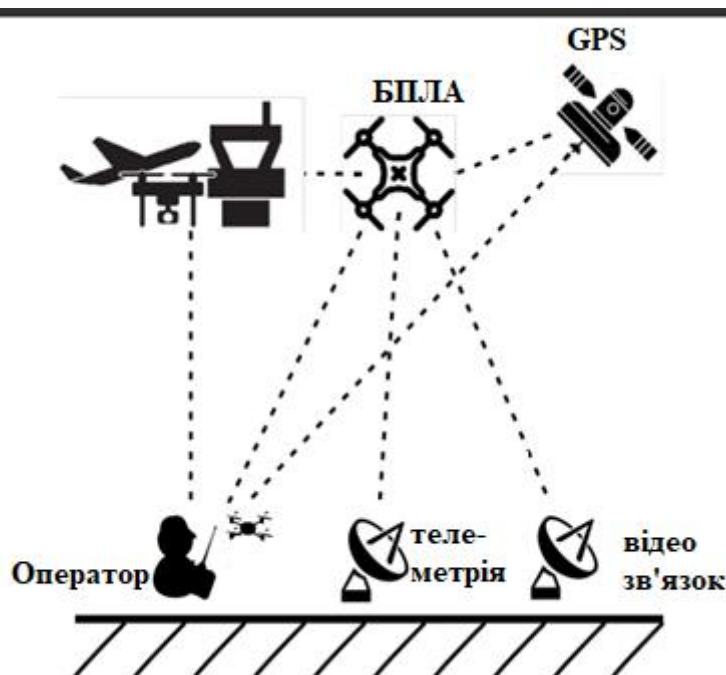


Рис.1.7. Типова топологія радіозв'язку з БПЛА

Основними задачами при виборі антени для БПЛА стають задачі забезпечення радіовидимості між літальним апаратом та наземним комплексом управління, компенсація сильного затухання сигналу на трасі, забезпечення завадостійкості зв'язку та досягання необхідної пропускну здатності радіоканалу. Пряма видимість між літальним апаратом і наземним комплексом керування може бути досягнута за рахунок збільшення висоти польоту літального апарату і/або збільшення висоти підняття наземної антени. На практиці, у більшості сучасних дронів передача даних у реальному часі може досягатися максимум до 300 км, для більш великих відстаней зазвичай використовують ретрансляційне обладнання або супутникові системи передачі інформації [8]. Для компенсації великого затухання сигналу на трасі треба збільшити вихідну потужність передавача або збільшити коефіцієнт підсилення антенного обладнання. Підвищення коефіцієнту підсилення бортового або наземного антено-фідерного обладнання досягається за рахунок, наприклад, використання опорно-обертового пристрою.

Дистанційно керовані дрони, як і будь-які інші радіокеровані пристрої, потребують системи радіоуправління, що складається з передавача та приймача, необхідних для керування БПЛА. Крім того, щоб уникнути втрати дрона, деяка

інформація надсилається назад на пульт дистанційного керування. Ця функція називається телеметрією. Зазвичай пульти дистанційного керування (RC) мають одну або дві монопольні антени (також їх називають стрижневими антенами). Коли антени розташовані вертикально, найсильніший сигнал знаходиться на лінії, перпендикулярній до них. Тому найкраще регулювати напрямок антен відповідно до положення літака та уникати польоту літака безпосередньо над торцем антен, щоб підтримувати міцне бездротове з'єднання.

Для врахування всіх цих вимог, самим головним параметром антен для БПЛА є частота. Більшість дронів працюють у діапазоні частот 2,4 ГГц або 5,8 ГГц. Антени з більш високою частотою частіше використовують для задач, де критично важливою є якість та швидкість передачі відеозображення. Загалом антени з нижчою частотою більші за антени з високою частотою.

Також, не менш важливим параметром є поляризація антени: лінійна або обертова (рис.1.8). Поляризація важлива, оскільки приймальна антена повинна мати ту саму поляризацію, що й передавальна антена, щоб максимізувати отриману потужність.

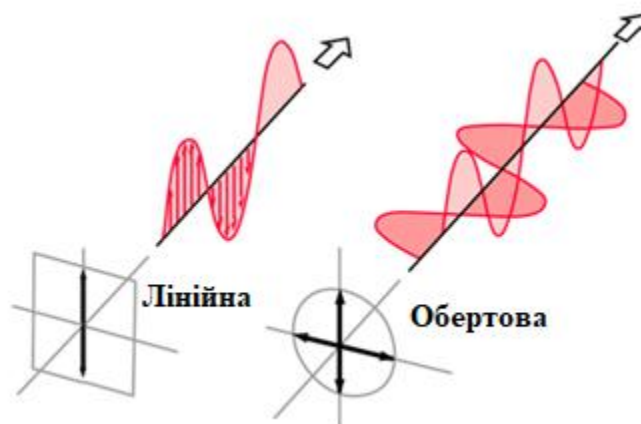


Рис.1.8. Види поляризації антен

В ідеальному випадку, бортова антена має бути в такому положенні, де теоретично між нею та наземною антенами завжди можна провести лінію, не закриваючи її рамою дрона. Найкращим рішенням для цього є встановлення антени позаду безпілота під кутом.

Щоб визначити, яке найкраще розміщення антени та щоб уникнути блокування сигналу на дроні чи передавачі (пульт дистанційного керування чи передавач відеосигналу), використовують комп'ютерне моделювання, наприклад, Altair FEKO.

1.3. Параметри антен для безпілотних літальних апаратів

Всі антени для БПЛА доречно поділити на ті, що використовуються у бортовому сегменті, і ті, що встановлено на наземній станції. І вже відповідно до розташування і призначення антени, можна розібрати їх параметри.

Кілеві всенаправлені антенни – бортова антенна система, що встановлюється на БПЛА типу “літаюче крило”, інтегруючись у кіль літального апарату. Така антена виконана у вигляді мікросмужкової антени (рис. 1.9.) і може працювати у широкому діапазоні частот: від 920 МГц до 18 ГГц та мати коефіцієнт підсилення від 4 до 10 дБ.

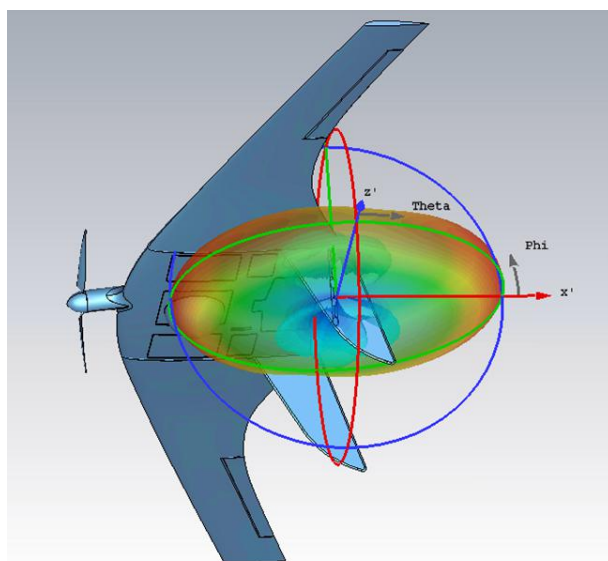


Рис.1.9. Кілева антена

Всенаправлені антени використовуються на квадрокоптерах, так як досить ефективно зменшують вплив багаторазових відбивань від елементів конструкції квадрокоптера за рахунок поляризаційних властивостей антени (рис. 1.10). Такий

тип антен забезпечую рівномірну діаграму спрямованості. Зазвичай, працює в діапазоні частот від 920 МГц до 12 ГГц та має коефіцієнт підсилення близько 2-3 дБ.

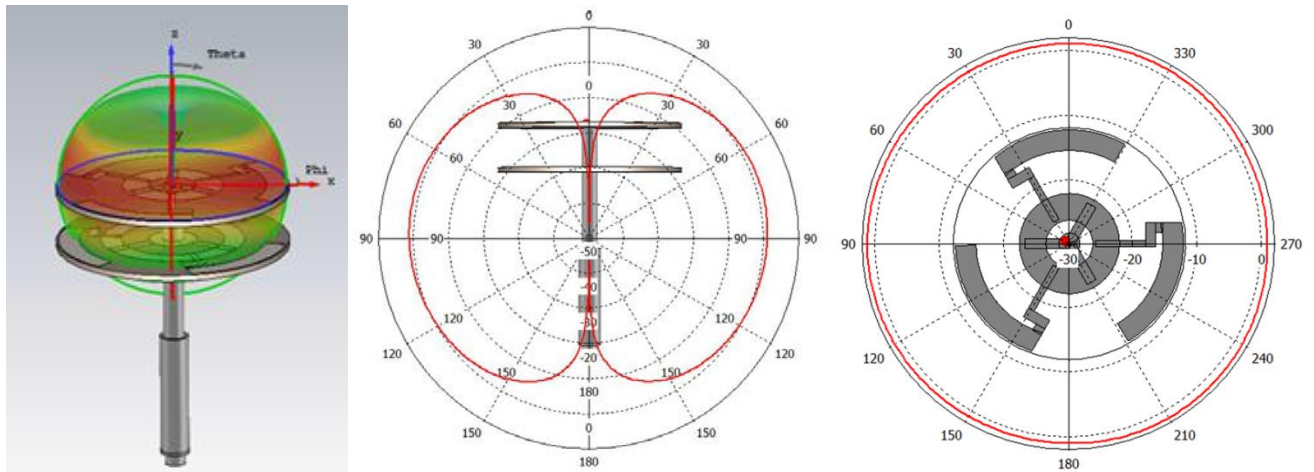


Рис.1.10. Всенаправлена антена для квадрокоптера

Найважливішими параметрами антени для розрахунку максимальної дальності зв'язку (рис. 1.11) можна вважати:

1. Робоча частота;
2. Потужність передавача;
3. Підсилення антени передавача;
4. Втрати у фідері антени передавача;
5. Підсилення антени приймача;
6. Втрати у фідері антени приймача;
7. Чутливість приймача;
8. Множник послаблення, враховуючий додаткові втрати за рахунок впливу поверхні Землі, рослинності, атмосфери та інших факторів.

Загальне рівняння розрахунку максимальної дальності зв'язку (рис. 1.11) можна описати таким чином:

$$R_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi f} 10^{\frac{R_{TXdBm} + G_{TXdB} + L_{TXdB} + G_{RXdB} + L_{RXdB} + |V|_{dB} - P_{RXdBm}}{20}} \quad (\text{м}),$$

де f – робоча частота (Гц); R_{TXdBm} – потужність передавача (дБм); G_{TXdB} – коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБ); L_{TXdB} – втрати у фідері антени передавача (дБ); G_{RXdB} – коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБ); L_{RXdB} – втрати у

фідері антени приймача (дБ); $|V|_{dB}$ – множник послаблення, який враховує додаткові втрати через вплив земної поверхні та інших факторів (дБ); P_{RXdBm} – чутливість приймача (дБм).

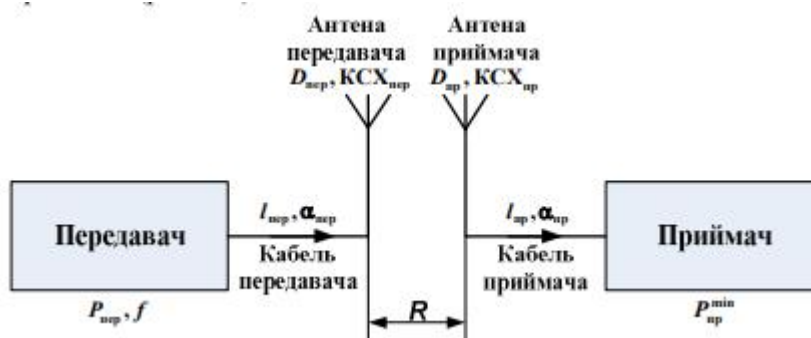


Рис. 1.11. Структура схеми радіолінії

Розглядаючи параметри антени, фактична дальність радіозв'язку залежить від погонного затухання та підсилення антен. Розглядаючи параметри модему, з рівняння дальності видно, що дальність залежить тільки від двох параметрів модема: потужності передавача R_{TXdBm} і чутливості приймача P_{RXdBm} . Тому енергетичний бюджет модему:

$$B_m = R_{TXdBm} - P_{RXdBm}.$$

Тобто, при сталих параметрах антени, задля досягнення більшої дальності зв'язку, вибір модему повинен бути таким, щоб мати або якнайбільший показник потужності передавача, або якнайменшу чутливість приймача.

В більшості випадків, важливішим є параметр чутливості приймача, оскільки занадто потужний передавач широкосмугового модему може призвести до проблем з надмірно високими енергозатратами, необхідністю охолодження, погіршення електромагнітної сумісності з іншим бортовим обладнанням БПЛА, низька енергетична скритність. Проблеми високих енергозатрат пов'язані з використанням у сучасних методах передачі великих даних лінійних передатчиків, КПД яких становить до 30%. Лінійні передатчики використовують для передачі інформації у вигляді OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів), GMSK (Gaussian Minimum Shift

Keying – гаусівська двохпозиційна частотна маніпуляція з мінімальним зсувом)/GFSK (Frequency Shift Keying) – частотна маніпуляція).

Чутливість приймача характеризується його спроможністю виокремлювати інформацію з сигналу на вході з заданим рівнем якості. Критерії якості можуть бути різноманітними. Для цифрових систем зв'язку частіше всього використовують ймовірність помилки на біт (bit error rate – BER) або ймовірність помилки в інформаційному пакеті (frame error rate – FER). Тобто, чутливість є рівнем того самого сигналу, з якого треба виявити інформацію. Тобто, при заданій чутливості, наприклад, у -80 дБм при $BER = 10^{-4}$, можна зробити висновок, що при чутливості нижче, наприклад, у -81 дБм, неможливо дістати інформацію з заданим рівнем бітових помилок. Це явище можна виразити за допомогою теореми Шеннона-Хартлі:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

де C – пропускна здатність каналу (біт/с); B – смуга пропускання каналу (Гц); S – потужність сигналу (Вт); N – потужність шуму (Вт).

Також, модеми можна розглядати з точки зору наявності і підтримки симплексного та дуплексного режимів. Широкополосні модеми для БПЛА підтримують симплексні або дуплексні режими роботи. Симплексний зв'язок – зв'язок, за якого інформація передається тільки в одному напрямку. Існують два визначення симплексного зв'язку. За визначенням ANSI схема симплексного зв'язку дозволяє передавати сигнали завжди тільки в одному напрямку. Дуплексний зв'язок – зв'язок, що утворений двома з'єднаними пристроями, які можуть вести комунікацію між собою в обох напрямках. Великою перевагою дуплексного режиму є можливість використовувати інтерфейс Ethernet.

Для підвищення завадостійкості, антенна система повинна дотримуватися принципу RXdiversity (рознесений прийом антен) – спосіб знизити вплив відбиваючих радіо хвиль на якість та консистентність приймальних даних. Наявність на наземній станції двох антен, розташованих на різній висоті можуть знизити вплив відбиваючих радіохвиль, так як у одній антені промені будуть складатися у протифазі, в той час як в іншій синфазно.

1.4. Протоколи та стандарти модуляції

Протоколи і стандарти модуляції для радіоапаратури БПЛА та наземних станцій можна розділити на досить велику кількість груп. Типову діаграму використання різних протоколів та інтерфейсів комунікації можна представити такою, як на рис.1.12.

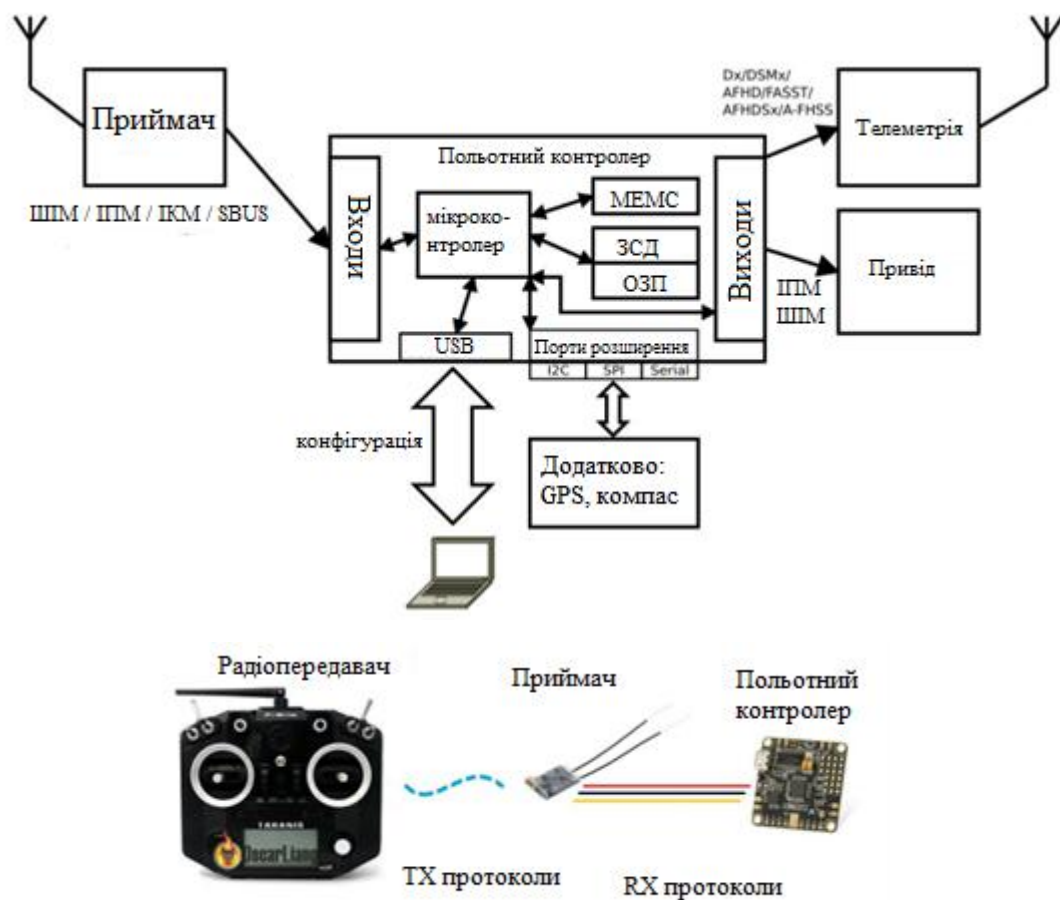


Рис. 1.12. Діаграма польотного контролеру (або примітивної наземної станції, виключаючи приводи)

RC (remote control) – віддалене керування. RC є важливою частиною будь-якого БПЛА. В залежності від рівня автономності і режиму польоту може підтримувати ручний режим роботи (обов'язково), напіваавтоматичний (людина корегує політ) або повністю автономним. На фізичному рівні, зазвичай RC працює

на частотах 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz, 5.8 GHz. Раніше також використовувались 27 MHz і 35 MHz.

На логічному рівні (RX), RC може використовувати безліч різних протоколів, таких як:

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція. Модуляція, у якій керування шириною високочастотних імпульсів здійснюється низькочастотним сигналом. ШИМ використовує прямокутні імпульсні хвилі, у яких довжина імпульсу модулюється, що призводить до середнього значення форми хвилі (рис. 1.13) [9].

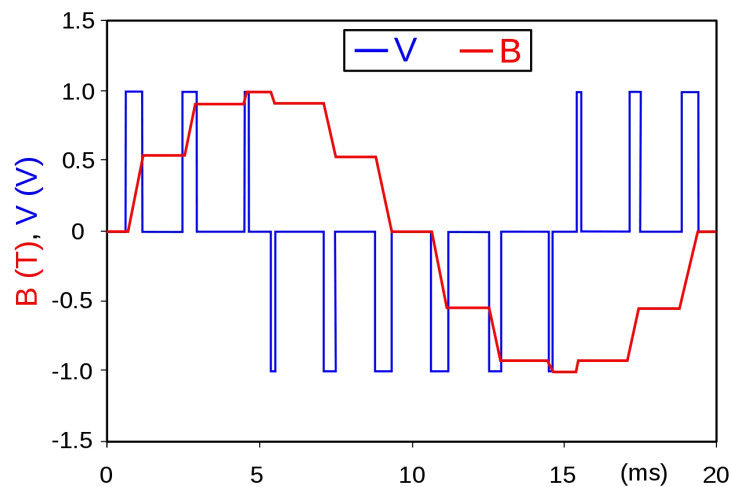


Рис. 1.13. Приклад використання ШИМ

Якщо взяти форму імпульсу $f(t)$ з періодом T , мінімумом $y_{\min}$ і максимумом $y_{\max}$, робочим циклом D , середнє значення хвилі буде:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt.$$

Так як $f(t)$ є імпульсною хвилею, її значення $y_{\max}$ при $0 < t < DT$ і $y_{\min}$ при $DT < t < T$. Таким чином, значення хвилі можна виразити:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{\max} dt + \int_{DT}^T y_{\min} dt \right) = \frac{1}{T} (DT y_{\max} + T(1-D) y_{\min}) = D y_{\max} + (1-D) y_{\min}.$$

Так як у більшості випадків $y_{\min} = 0$, значення $\bar{y}$ буде залежати тільки від D , то $\bar{y} = D y_{\max}$.

Переваги використання ШИМ:

- аналоговий;

- зручне поєднання з простим керуванням приводів БПЛА;
- простота декодування;
- широке використання.

Основні недоліки:

- неможливість передавання великої кількості даних;
- лімітований у числі конкурентних каналів (зазвичай 4);
- відносно застарілий.

ІПМ – імпульсно-позиційна модуляція – форма модуляції сигналу, у якій M бітів повідомлення кодуються шляхом передачі одного імпульсу в одному з 2^M можливих необхідних часових зрушень. Це повторюється кожні T секунд, так що швидкість передачі становить M/T біт на секунду (рис. 1.14) [10]. Це в першу чергу корисно для систем оптичного зв'язку, які, як правило, мають невеликі або взагалі не мають багатопроменевих перешкод.

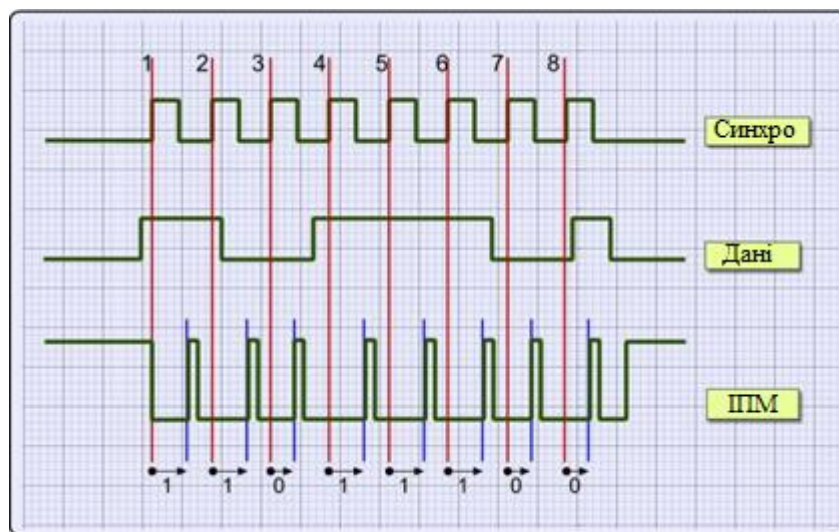


Рис.1.14. Формування ІПМ сигналу

Переваги використання ІПМ:

- аналоговий;
- об'єднує канали ІПМ в один радіоканал, потім приймач розкладає їх і спрямовує до окремих ІПМ контролерів, що керують сервоприводами/двигунами.

Недоліки:

- повільність.

ІКМ – імпульсно-кодова модуляція – метод, який використовується для цифрового представлення дискретизованих аналогових сигналів. Це стандартна форма цифрового аудіо в комп'ютерах, компакт-дисках, цифровій телефонії та інших програмах цифрового аудіо. У потоці РСМ амплітуда аналогового сигналу регулярно дискретизується через однакові інтервали, і кожна вибірка квантується до найближчого значення в межах діапазону цифрових кроків (рис. 1.15) [11].

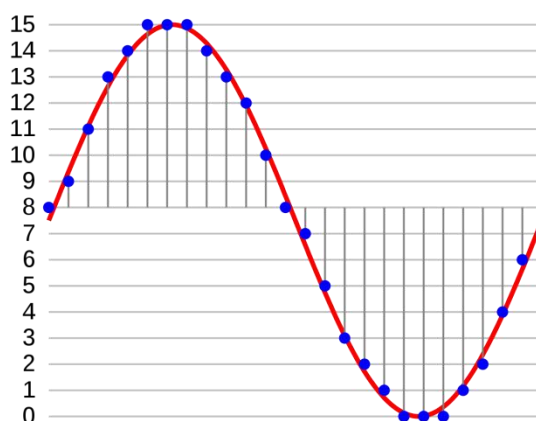


Рис.1.15. Імпульсно-кодова модуляція

Переваги використання ІКМ:

- наявність контролю передачі;
- підвищена завадостійкий.

SBUS – протокол послідовної передачі даних, який поєднує у собі до 18 каналів ШІМ всього в одному проводі, використовується досить популярними розробниками радіоапаратури БПЛА (Futaba, Frsky). Зручний у використанні, так як по суті може працювати з RX портом протоколу UART польотного контролеру (але для деяких мікроконтролерів потрібно використовувати інвертор, так як SBUS працює з інвертованою TTL логікою). Аналоги (та більш сучасні послідовники) SBUS є: iBUS, XBUS, CRSF (Crossfire).

Також, серед послідовних протоколів які широко використовуються, можна виділити MSP (Multiwii Serial Protocol) та FPort. Серед особливостей MSP – можливість використовувати MSP команди для комунікації. Особливості FPort: на відміну від SBUS, повністю сумісний з RX лінією інтерфейсу UART.

На транспортному рівні (TX), у більшості випадках використовуються пропріетарні протоколи від виробників радіоапаратури. Зазвичай використовуються наступні протоколи та модуляції сигналу.

Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (ППРЧ, FHSS – Frequency-hopping spread spectrum) – вид модуляції смуги пропускання. Метод полягає в тому, щоб передавати сигнали швидким псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти. Зміна частоти носія відбувається стрибкоподібно і періодично, за алгоритмом, відомим для приймача і передавача. FHSS використовується для уникнення перешкод, запобігання прослуховування та забезпечення зв'язку з множинним доступом із кодовим розділенням (CDMA). Піддіапазони вибираються з доступного діапазону. Так як несучі частоти сигналів стрибкоподібно змінюються серед центральних частот, перешкоди на певній частоті впливатимуть на сигнал лише протягом короткого інтервалу [12].

Схематично, ППРЧ передавач представлено на рис.1.16. А приклад результуючого сигналу на рис.1.17.

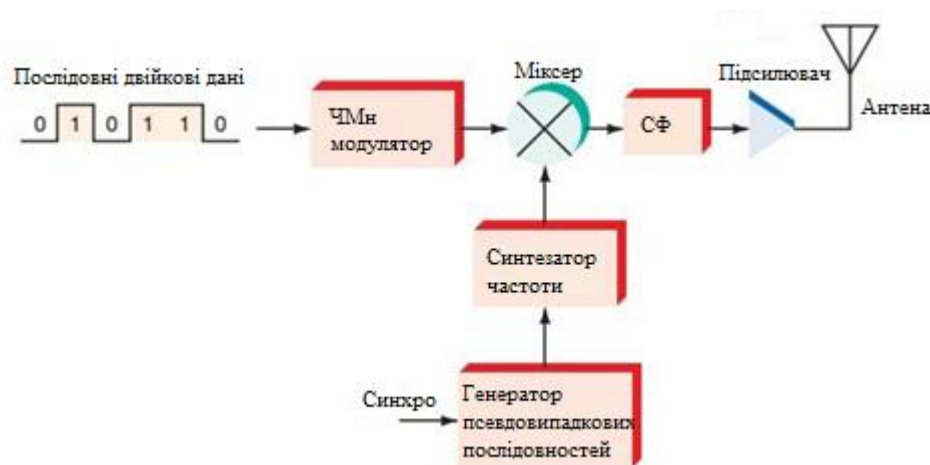


Рис.1.16. Передавач ППРЧ модульованого сигналу

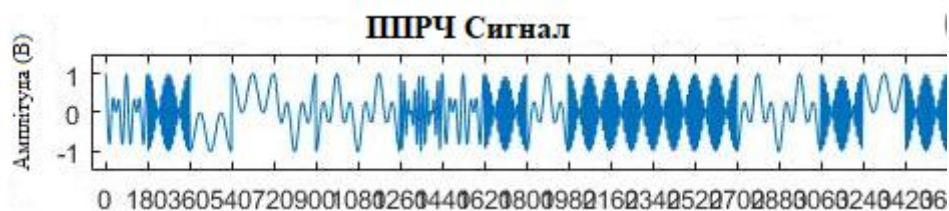


Рис.1.17. Приклад ППРЧ модульованого сигналу

ППРЧ має такі переваги над передачею на фіксованій частоті:

- сигнали ППРЧ дуже стійкі до вузькосмугових перешкод, так як смуга частот сигналу постійно змінюється;
- так як алгоритм зміни частоти відомий тільки приймачу і передавачу, то такий сигнал досить важко перехопити приймачем, якому даний алгоритм невідомий;
- ускладнюється придушення сигналу;
- передачі FHSS можуть спільно використовувати діапазон частот з багатьма типами звичайних передач з мінімальними взаємними перешкодами;
- сигнали FHSS створюють мінімальні перешкоди для вузькосмугового зв'язку, і навпаки.

Даний тип модуляції дуже широко використовується військовими США. Завдяки секретному ключу безпеки TRANSEC, який використовують приймач і передавач генерується шаблон стрибкоподібної зміни частот. Військові радіостанції США, які використовують стрибкоподібну зміну частоти, включають сімейство JTIDS/MIDS, систему аеронавігаційного мобільного зв'язку HAVE QUICK і SINCGARS CombatNetRadio, Link-16.

Загальна смуга пропускання, необхідна для стрибкоподібної зміни частоти, набагато ширша, ніж необхідна для передачі тієї самої інформації з використанням лише однієї несучої частоти. Але оскільки передача відбувається лише на невеликій частині цієї смуги пропускання в будь-який момент часу, миттєва смуга пропускання перешкод насправді однакова. Не забезпечуючи додаткового захисту від широкосмугового теплового шуму, підхід зі стрибками частоти зменшує погіршення, спричинене джерелами вузькосмугових перешкод.

Однією з проблем систем зі стрибкоподібною зміною частоти є синхронізація передавача та приймача. Один із підходів полягає в тому, щоб мати гарантію, що передавач використовуватиме всі канали протягом фіксованого періоду часу. Потім приймач може знайти передавач, вибравши випадковий канал і прослухавши дійсні дані на цьому каналі. Дані передавача ідентифікуються спеціальною послідовністю даних, яка навряд чи виникне в сегменті даних для цього каналу, і сегмент також може мати контрольну суму для перевірки цілісності та подальшої ідентифікації.

Передавач і приймач можуть використовувати фіксовані таблиці шаблонів стрибків частоти, щоб після синхронізації вони могли підтримувати зв'язок, дотримуючись таблиці.

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – розширений спектр прямої послідовності – вид модуляції розширеного спектру, зазвичай використовується для зменшення загальних перешкод сигналу. Модуляція прямої послідовності робить смугу пропускання переданого сигналу ширшою, ніж смуга пропускання інформації. Після згортання або видалення модуляції прямої послідовності в приймачі пропускна здатність інформації відновлюється, а ненавмисні та навмисні перешкоди суттєво зменшуються [13].

DSSS зсуває фазу синусоїди псевдовипадковим чином за допомогою безперервного рядка фрагментів, кожен з яких має набагато меншу тривалість, ніж інформаційний біт. Тобто кожен інформаційний біт модулюється послідовністю набагато швидших фрагментів. Тому швидкість фрагменту значно вища за швидкість передачі інформації.

DSSS використовує структуру сигналу, в якій послідовність розповсюдження, створена передавачем, уже відома приймачу. Потім приймач може використовувати ту саму послідовність розширення, щоб протидіяти її впливу на прийнятий сигнал, щоб реконструювати інформаційний сигнал.

DSSS помножує дані, що передаються, на псевдовипадкову послідовність розширення, яка має набагато вищу швидкість передачі даних, ніж початкова швидкість передачі даних. Результуючий переданий сигнал нагадує обмежений смугою білий шум, як аудіозапис "статки". Однак цей шумоподібний сигнал використовується для точної реконструкції вихідних даних на приймальному кінці шляхом множення їх на ту саму послідовність розширення (оскільки $1 \times 1 = 1$, і $-1 \times -1 = 1$). Цей процес, відомий як згортання, математично є кореляцією переданої послідовності розширення з послідовністю розширення, яку приймач уже знає, що використовує передавач. Після згортання співвідношення сигнал/шум приблизно збільшується на коефіцієнт розширення, який є відношенням швидкості послідовності розширення до швидкості передачі даних.

У той час як переданий сигнал DSSS займає набагато ширшу смугу пропускання, ніж вимагала б проста модуляція вихідного сигналу, його частотний спектр може бути дещо обмежений для економії спектру звичайним аналоговим смуговим фільтром, щоб отримати приблизно параболоподібнуогиначу з центром на несучій частоті, навідміну від FHSS, де розширений спектр зі стрибками частоти псевдовипадково переналаштовує несучу та вимагає рівномірної частотної характеристики, оскільки будь-яке формування смуги пропускання призведе до модуляції амплітуди сигналу кодом стрибкоподібної зміни.

Якщо небажаний передавач передає на тому самому каналі, але з іншою послідовністю розширення (або без послідовності взагалі), процес згортання зменшує потужність цього сигналу. Цей ефект є основою для властивості множинного доступу з кодовим розділенням каналів (CDMA) DSSS, яка дозволяє декільком передавачам спільно використовувати один канал у межах властивостей крос-кореляції їхніх послідовностей розширення.

DSM (DSM2/DSMX) – основний тип модуляції для апаратури від Spektrum RC. DSM2 і DSMX широко використовуються для передавачів і приймачів 2,4 ГГц. Протокол дає можливість мати декілька приймачів/передавачів у діапазоні 2,4 ГГц без особливих перешкод.

Існує лише невелика різниця між DSM2 і DSMX, яка полягає в методі перемикання між різними каналами. У протоколі DSM2 передавач вибере два випадкових канали, де передавач шукатиме два найкращі канали в оптимальному випадку. У протоколі DSMX і передавач, і приймач використовують ідентифікатор радіочіпа передавача, який надсилається під час процесу зв'язування, для створення 23 каналів. Щоразу, коли передавач передає пакет або приймач отримує пакет, вони переходять на наступний канал.

З цієї інформації можна зробити висновок, що у випадку DSM2, коли обидва вибрані канали використовуються багатьма іншими користувачами, якість приймального сигналу значно впаде. У протоколі DSMX ця проблема була вирішена, і стало можливим мати набагато більше передавачів/приймачів на тій самій смузі пропускання.

Приклад пакету DSMX зображено на рис. 1.18.



Рис.1.18. Приклад пакету DSM2/DSMX

На рис. 1.18: SOP код-старт пакету 1 або 2 байти, які додаються до початку пакета радіочіпом. Ці байти використовуються для визначення того, чи отримано пакет на певному каналі. Length – байт довжини пакету, що відправляється після SOP коду, включає тільки довжину корисного інформаційного навантаження. Згідно з розміром в 1 байт, можна зробити висновок, що максимальна довжина пакету даних – 255. Але, зазвичай довжина пакету визначена 16 байтами, тому інформація просто дробиться на декілька пакетів. Payloaddata – корисна інформація. CRC – циклічний надлишковий код. Контрольна сума розміром 2 байти, яка надсилається у кінці пакету для перевірки, чи є отриманий пакет валідним. Він може виявити такі помилки: будь-яку помилку з одним бітом, помилку з будь-якими двома бітами, будь-яку непарну кількість бітів у помилці та вибух помилки розміром із саму контрольну суму.

FSK (Frequency-shift keying) і **GFSK** (GaussianFSK) – схема частотної модуляції, в якій цифрова інформація передається через дискретні частотні зміни несучого сигналу [14]. Найпростішим FSK є двійковий FSK (BFSK). BFSK використовує пару дискретних частот для передачі двійкової (0 і 1) інформації (рис. 1.19). У цій схемі 1 називається частотою позначки, а 0 — просторовою частотою.

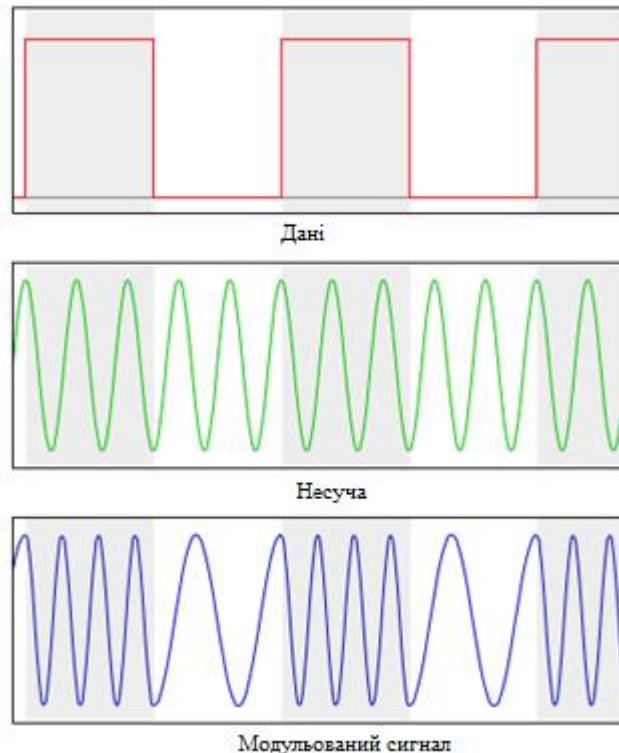


Рис. 1.19 Приклад BFSK

FSK для демодуляції сигналу використовує алгоритм Герцеля. Фільтр Герцеля працює на вхідній послідовності $x[n]$ на каскаді з двох етапів із параметром ω_0 .

Спочатку, розраховується проміжна послідовність $s[n]$:

$$s[n] = x[n] + 2 \cos(\omega_0) s[n-1] - s[n-2].$$

Потім, застосовується фільтр, видаючи результуючу послідовність $y[n]$:

$$y[n] = s[n] - e^{-j\omega_0} s[n-1]$$

Перший ступінь фільтра можна розглядати як ІІР-фільтр другого порядку зі структурою прямої форми. Ця конкретна структура має властивість, що її внутрішні змінні стану дорівнюють минулим вихідним значенням цього етапу. Припускається, що всі вхідні значення $x[n]$ для $n < 0$ дорівнюють 0. Для встановлення початкового стану фільтра, щоб розрахунок починався з $x[0]$, станам фільтра присвоюються початкові значення $s[-2] = s[-1] = 0$. *Щоб уникнути* небезпеки накладання спектрів, частота ω_0 часто обмежується значеннями від 0 до π (вибірка Найквіста-Щенона).

Фільтр другого етапу можна розглядати як FIR-фільтр, оскільки його обчислення не використовують жодних попередніх виходів.

Модуляція GFSK працює схожим чином як і FSK, за виключенням того, що послідовність інформаційних імпульсів перед потраплянням на FSK модулятор, проходить для згладжування фільтр Гауса, що забезпечує зменшення ширини спектру сигналу.

LoRa (*“longrange”*) – пропріетарна технологія модуляції, що забезпечує малопотужну мережу передачі даних на відстані до 10-15 км зі швидкістю 0.3-50 кб/с (схематично протокол зображено на рис. 1.20).

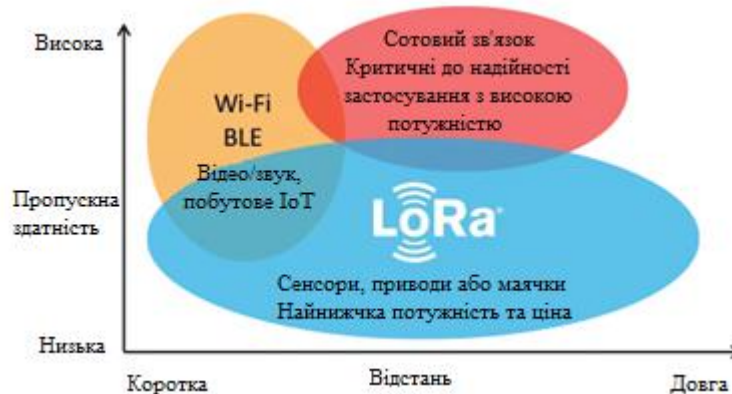


Рис.1.20. Протокол LoRa

В основах LoRa лежать методи модуляції з розширеним спектром, оснований на технології chirp spread spectrum [15]. Як і в інших методах розширеного спектру, chirp spread spectrum використовує всю виділену смугу пропускання для трансляції сигналу, що робить його стійким до шуму. Крім того, оскільки для chirpspreadspectrumсигналів використовується широка смуга спектру, chirpspreadspectrumсигнали також стійкі до багатопроменевого замирання навіть при роботі на дуже низькій потужності. Однак він відрізняється від DSSS або FHSS тим, що він не додає жодних псевдовипадкових елементів до сигналу, щоб допомогти відрізнити його від шуму в каналі, натомість покладаючись на лінійний характер chirp-імпульсу. Крім того, chirpspreadspectrumстійкий до ефекту Доплера, типового для мобільного радіо.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – тип цифрової передачі та метод кодування цифрових даних на кількох несучих частотах. OFDM перетворився на популярну схему широкосмугового цифрового зв'язку, яка використовується в

таких програмах, як цифрове телебачення та аудіомовлення, доступ до Інтернету DSL, бездротові мережі, мережі ліній електропередач і мобільний зв'язок 4G/5G.

Концептуально OFDM це спеціалізований метод мультиплексування з частотним поділом каналів (FDM) із додатковим обмеженням, що всі сигнали піднесучих у каналі зв'язку є ортогональними один одному.

У OFDM частоти піднесучих вибираються так, щоб піднесучі були ортогональними одна одній, що означає, що перехресні перешкоди між підканалами усуваються, і захисні смуги між несучими не потрібні. Це значно спрощує конструкцію як передавача, так і приймача; на відміну від звичайного FDM, окремий фільтр для кожного підканалу не потрібен.

Ортогональність вимагає, щоб інтервал піднесучих був рівним $\Delta f = k / T_u \text{ Гц}$, де T_u (сек.) – корисна тривалість символу (розмір вікна приймача), а k – коефіцієнт, додатне число, зазвичай рівне 1. Це передбачає, що кожна несуча частота проходить k більше повних циклів за період символу, ніж попередня несуча. Отже, з N піднесучими загальна смуга пропускання становитиме $B \approx N \cdot \Delta f \text{ (Гц)}$.

Ортогональність також забезпечує високу спектральну ефективність із загальною швидкістю символів, близькою до швидкості Найквіста для еквівалентного основного сигналу (тобто близько половини швидкості Найквіста для двостороннього сигналу фізичної смуги пропускання). Можна використовувати майже весь доступний діапазон частот.

OFDM вимагає дуже точної частотної синхронізації між приймачем і передавачем; з відхиленням частоти піднесучі більше не будуть ортогональними, викликаючи інтерференцію між несучими (тобто перехресні перешкоди між піднесучими). Зміщення частоти зазвичай спричинені неузгодженістю генераторів передавача та приймача або доплерівським зсувом через рух. Хоча приймач може компенсувати сам по собі доплерівський зсув, ситуація погіршується в поєднанні з багатопроменевістю, оскільки відбиття з'являються при різних зсувах частоти, що набагато важче виправити. Цей ефект зазвичай посилюється зі збільшенням швидкості та є важливим фактором, що обмежує використання OFDM у високошвидкісних транспортних засобах [16]. Щоб пом'якшити інтерференцію в

таких сценаріях, можна формувати кожен піднесучу, щоб мінімізувати перешкоди, що призводять до накладання неортогональних піднесучих. Наприклад, схема низької складності, яка називається WCP-OFDM (зважене циклічне префіксне мультиплексування з ортогональним поділом частот), полягає у використанні коротких фільтрів на виході передавача для виконання потенційно непрямокутного формування імпульсу та майже ідеальної реконструкції за допомогою вирівнювання однієї піднесучої. Інші методи придушення інтерференційного впливу зазвичай різко збільшують складність приймача.

Сигнал несучої OFDM є сумою ряду ортогональних піднесучих, причому дані основної смуги на кожній піднесучій незалежно модулюються зазвичай за допомогою певного типу квадратурної амплітудної модуляції (QAM) або фазової маніпуляції (PSK). Цей складений базовий сигнал зазвичай використовується для модуляції основної радіочастотної несучої. Приклад передавача OFDM модульованого сигналу на рис.1.21.

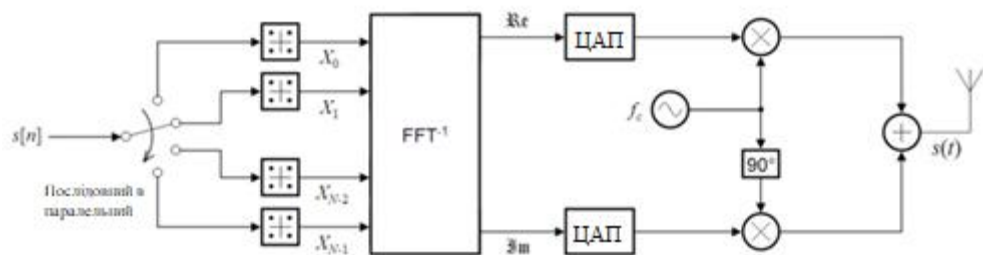


Рис.1.21. Передавач OFDM

$s[n]$ – це послідовний потік двійкових цифр. За допомогою інверсного мультиплексування вони спочатку демультимплексуються в N паралельних потоків, і кожен з них відображається на потік символів за допомогою деякої сукупності модуляції (QAM, PSK тощо). Для кожного набору символів обчислюється зворотне швидке перетворення Фур'є, що дає набір складних вибірок у часовій області. Ці зразки потім квадратурно змішуються до смуги пропускання стандартним способом. Реальні й уявні компоненти спочатку перетворюються в аналогову область за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (DAC); потім аналогові сигнали використовуються для модуляції косинусної та синусоїдальної хвиль на несучій

частоті f_c відповідно. Потім ці сигнали підсумовуються, щоб отримати сигнал передачі $s(t)$.

Приймач приймає сигнал $r(t)$, який потім квадратурно міксується до базової смуги за допомогою косинусних і синусоїдальних хвиль на несучій частоті. Це також створює сигнали, зосереджені на $2f_c$, тому для їх відхилення використовуються фільтри низьких частот. Сигнали базової смуги потім дискретизуються та оцифровуються за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), а пряме БПФ використовується для перетворення назад у частотну область. Це повертає N паралельних потоків, кожен з яких перетворюється на двійковий потік за допомогою відповідного детектора символів. Потім ці потоки повторно об'єднуються в послідовний потік $\hat{s}[n]$, який є оцінкою вихідного двійкового потоку на передавач. Приклад приймача OFDM модульованого сигналу на рис. 1.22.

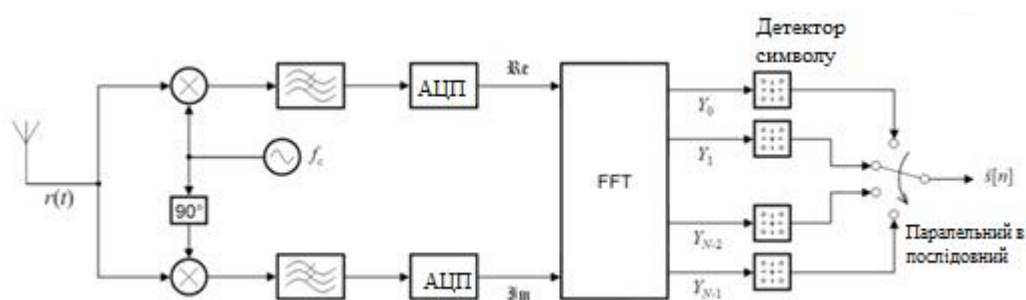


Рис.1.22. Приймач OFDM

Якщо використовується N піднесучих, і кожна піднесуча модулюється за допомогою M альтернативних символів, алфавіт символів OFDM складається з M^N комбінованих символів (рис. 1.23).

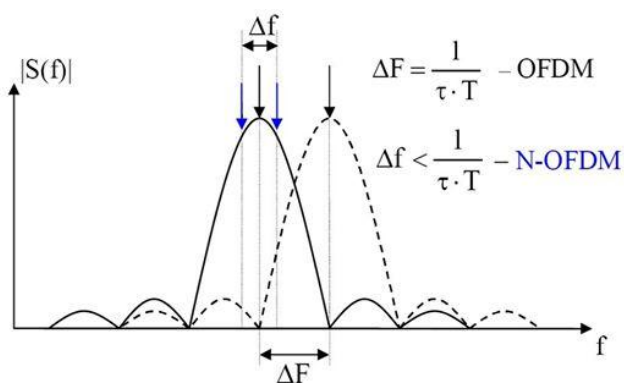


Рис. 1.23. Система піднесучих сигналів OFDM після ШПФ

COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – вид OFDM, що доповнює його канальним кодуванням, використовуючи пряму корекцію похибок щоб виправити помилки при передачі даних [17].

Основна перевага COFDM – завадостійкість.

У телеметрії COFDM використовується найчастіше як метод модуляції для стандарту DVB-T (Digital Video Broadcasting), що широко використовується для передачі відео у цифровому форматі. Цей стандарт використовує 2048 – режим “2K” (8192 – режим “8K” у ранніх версіях). Таким чином, частотне рознесення становить 4464 Гц для 2K і 1116 Гц для 8K, число частот носіїв (N): 1705 і 6817 відповідно.

Wi-Fi – бездротовий мережевий протокол, дуже широко використовується у якості каналу телеметрії, перш за все, завдяки зручності використання зі стеком TCP/IP, як наслідок дуже високої сумісності з широким спектром радіоапаратури, навіть не спеціалізованої, наприклад як смартфон або звичайний ноутбук. Підтримка TCP/IP дозволяє використовувати протоколи TCP і UDP. UDP – для передачі відео та іншої критичної до швидкості інформації, TCP – для 100% гарантії надходження інформації. Для модуляції сигналів використовує описані вище стандарти модуляції DSSS для стандарту 802.11b, та OFDM для стандарту 802.11a [18].

Як і в інших локальних мережах IEEE 802, станції постачаються з глобальною унікальною 48-бітною MAC-адресою (часто друкується на обладнанні), щоб кожна станція Wi-Fi мала унікальну адресу. MAC-адреси використовуються для визначення як адресата, так і джерела кожного пакета даних. Wi-Fi встановлює з'єднання на рівні зв'язку, яке можна визначити за допомогою адреси призначення та джерела. Під час отримання передачі приймач використовує адресу призначення, щоб визначити, чи передача стосується станції, чи її слід ігнорувати. Мережевий інтерфейс зазвичай не приймає пакети, адресовані іншим станціям Wi-Fi.

Канали використовуються в напівдуплексному режимі та можуть розподілятися між кількома мережами. Коли зв'язок відбувається по одному каналу, будь-яка інформація, надіслана одним комп'ютером, отримується локально для всіх, навіть якщо ця інформація призначена лише для одного адресата. Плата мережевого

інтерфейсу перериває роботу центрального процесора лише тоді, коли надходять відповідні пакети: карта ігнорує інформацію, яка їй не адресована. Використання одного каналу також означає, що смуга пропускання даних є спільною, наприклад, доступна смуга пропускання даних для кожного пристрою зменшується вдвічі, коли дві станції активно передають.

Схема, відома як множинний доступ із визначенням несучої з уникненням зіткнень (CSMA/CA), керує тим, як станції спільно використовують канали. За допомогою CSMA/CA станції намагаються уникнути зіткнень, починаючи передачу лише після того, як буде визначено, що канал «неактивний», але потім передають свої пакетні дані повністю. Однак з геометричних причин він не може повністю запобігти зіткненням. Зіткнення відбувається, коли станція отримує кілька сигналів на каналі одночасно. Це пошкоджує передані дані та може вимагати від станцій повторної передачі. Втрата даних і повторна передача у деяких випадках значно зменшують пропускну здатність.

Стандарт 802.11 надає кілька різних діапазонів радіочастот для використання в зв'язку Wi-Fi: діапазони 900 МГц, 2,4 ГГц, 3,6 ГГц, 4,9 ГГц, 5 ГГц, 5,9 ГГц і 60 ГГц. Кожен діапазон розділений на безліч каналів. У стандартах канали нумеруються з інтервалом 5 МГц у смузі (за винятком смуги 60 ГГц, де вони розташовані на відстані 2,16 ГГц), і номер відноситься до центральної частоти каналу. Хоча канали пронумеровані з інтервалом 5 МГц, передавачі зазвичай займають принаймні 20 МГц, а стандарти дозволяють з'єднувати канали разом для формування ширших каналів для більшої пропускну здатності.

До сильних недоліків використання Wi-Fi у якості телеметрії можна віднести:

- високе споживання енергії;
- погіршена дальність ніж у більшості інших способів комунікації;
- широке використовується протоколу у споживчій електроніці і, як наслідок, використання Wi-Fi для телеметрії у міському середовищі значно більше ускладнюється;
- великий час відновлення з'єднання при втраті зв'язку (скидання ISO/OSI);

- завелика складність для багатьох задач, в більшості випадках доречніше роздивитись використання більш легкого протоколу;
- висока затримка, у порівнянні з іншими протоколами.

Висновок

В даному розділі було проведено аналіз типів безпілотних літальних апаратів, їх область використання, принципи побудови радіообміну між БПЛА та наземною станцією а також розглянуто протоколи і стандарти модуляції, що можуть використовуватись у радіозв'язку з БПЛА. З проведеного аналізу, можна зробити висновок, що для керування найкраще всього підходять такі типи як ШІМ або ПІМ - так як вони є досить простими та швидкими у реальному часі, для телеметрії – LoRaOne, коли є необхідність передавати сигнал на дуже велику відстань (але не великі об'єми даних), FSK (GFSK) – для непоганої дальності та пропускної здатності, ППРЧ – для надійної та захищеної комунікації.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ ПОБУДОВИ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

2.1. Протоколи та інтерфейси з'єднань у системах мікроконтролерів

У вбудованій мікроелектроніці, внутрішня комунікація компонентів є однією з найважливіших задач при розробці комплексного приладу. У сучасних системах керування безпілотними літальними апаратами, для забезпечення виконання всіх необхідних функцій, використовуються комплексні системи, які містять в собі одну, а найчастіше 2 і більше систем на кристалі (SoC–Systemonchip). Кожна така система на кристалі, містить в собі від кількох одиниць до кількох десятків різноманітних виводів, які називаються Інтерфейс вводу/виводу загального призначення (GPIO–General-PurposeInput/Output). Цей інтерфейс керується програмно прошивкою, яка у поточний момент виконується мікроконтролером, та може служити як інтерфейс вводу, так і інтерфейс виводу [19]. Зазвичай, кожен інтерфейс можна налаштувати під одну з багатьох функцій, яку підтримує система на кристалі, від простого вводу/виводу сигналу заданого рівня, до режиму ШІМ, або роботі у якості інтерфейсу I2C чи SPI. Інтерфейс GPIO на мікросхемі реалізується багатьма різними способами. Деякі мікросхеми містять GPIO як основну функцію обміну даними, у той час як інші, використовують цей інтерфейс для розширення базового функціоналу. Наприклад, Intel 8255 забезпечує 24 інтерфейси GPIO, які можна використовувати з послідовними шинами зв'язку, такими як SMBus і I2C. В свою чергу, як протилежний приклад – Realtek ALC260 IC, у якого є основна функція аудіокодеку, поєднана з можливістю працювати з 8 різними інтерфейсами GPIO.

Мікросхеми мікроконтролерів зазвичай включають GPIO. Залежно від програми, GPIO мікроконтролера може містити його основний інтерфейс із зовнішньою схемою або це може бути лише один тип вводу/виводу, який

використовується серед кількох, наприклад, введення/виведення аналогового сигналу, лічильник/таймер і послідовний зв'язок. У деяких мікросхемах, зокрема мікроконтролерах, контакт GPIO може мати інші функції, ніж GPIO. Часто в таких випадках необхідно налаштувати контакт для роботи як GPIO (порівняно з іншими його функціями) на додаток до налаштування поведінки GPIO. Деякі пристрої мікроконтролера (наприклад, сімейство Microchip dsPIC33) містять внутрішню схему маршрутизації сигналу, яка дозволяє програмно відображати GPIO на контакти пристрою. Програмовані вентильні матриці (FPGA) розширюють цю можливість, дозволяючи програмно керувати відображенням контактів GPIO, створенням екземплярів і архітектурою.

Багато друкованих плат надають GPIO на рівні плати зовнішнім схемам через вбудовані електричні роз'єми. Зазвичай кожен такий GPIO доступний через спеціальний контакт роз'єму. Як і GPIO на основі мікросхем, деякі плати просто включають GPIO як зручний допоміжний ресурс, який доповнює основну функцію плати, тоді як на інших платах GPIO є центральною, основною функцією плати. Деякі плати, які зазвичай класифікуються як багатофункціональні плати введення/виведення, є комбінацією обох; такі плати забезпечують GPIO разом з іншими типами введення-виведення загального призначення. GPIO також можна знайти на платах вбудованих контролерів, таких як Arduino, BeagleBone і RaspberryPi [20].

Перевагою використання GPIO на рівні плати може бути забезпечення такого функціоналу: входи на тригері Шмітта, вихідні драйвери високого струму, оптичні ізолятори, або їх комбінація, що може служити для буферизації та захисту схем плати. Також, іноді реалізуються функції більш високого рівня, такі як усунення шумів вхідного сигналу, виявлення фронту вхідного сигналу або вихід широтно-імпульсної модуляції.

GPIO використовується в дуже різних цілях, що обмежені тільки електричними можливостями та можливостями швидкодії (часовою специфікацією), а також можливостями програмного забезпечення взаємодіяти з GPIO.

GPIO у своїй більшості використовують стандартні логічні рівні (зазвичай 5 або 3.3 В), тому не можуть подавати великий струм на вихідні навантаження.

За наявності відповідного потужного вихідного буфера (або механічного чи твердотільного реле) GPIO можна використовувати для керування потужними пристроями, такими як освітлення, соленоїди, нагрівачі та двигуни (наприклад, вентилятори та повітродувки). Подібним чином, вхідний буфер, реле або оптоізоляція часто використовуються для перетворення несумісного сигналу (наприклад, високої напруги) на логічні рівні, необхідні для GPIO.

Інтегральні схеми GPIO зазвичай використовуються для керування або моніторингу інших схем (включаючи інші мікросхеми) на платі. Приклади цього включають увімкнення та вимкнення роботи (або живлення) інших схем, зчитування станів бортових перемикачів і конфігураційних шунтів, а також керування індикаторами стану світлодіодів. В останньому випадку GPIO у багатьох випадках може забезпечити достатній вихідний струм для безпосереднього живлення світлодіода без використання проміжного буфера.

Декілька GPIO можна використовувати для Bit-Banging (організація послідовного з'єднання з використанням програмної емуляції замість спеціалізованого апаратного пристрою). Наприклад, два GPIO можна використовувати для реалізації шини послідовного зв'язку, такої як Inter-Integrated Circuit (I2C), а чотири GPIO можна використовувати для реалізації шини Serial Peripheral Interface (SPI); вони зазвичай використовуються для полегшення послідовного зв'язку з мікросхемами та іншими пристроями, які мають сумісні послідовні інтерфейси, такими як датчики (наприклад, датчики температури, датчики тиску, акселерометри) і контролери двигунів. У крайніх випадках, цей метод може бути використаний для реалізації цілої паралельної шини, таким чином дозволяючи зв'язок з орієнтованими на шину мікросхемами або друкованими платами.

Хоча GPIO є принципово цифровими за своєю природою, вони часто використовуються для керування лінійними процесами. Наприклад, GPIO можна використовувати для керування швидкістю двигуна, інтенсивністю світла або

температурою. Зазвичай це робиться за допомогою ШІМ, у якому робочий цикл вихідного сигналу GPIO визначає ефективну величину сигналу керування процесом. Наприклад, під час керування інтенсивністю світла світло може бути приглушено шляхом зменшення робочого циклу GPIO. Деякі лінійні процеси потребують лінійної керуючої напруги. У таких випадках можливо підключити GPIO, який працює як ШІМ-вихід, до RC-фільтра, щоб створити простий недорогий цифро-аналоговий перетворювач.

Інтерфейси GPIO дуже різноманітні. У деяких випадках вони прості – група контактів, які можуть перемикатися як група на вхід або вихід. В інших, кожен контакт може бути налаштований на прийом або джерело різних логічних напруг, у режимі pull-down чи pull-up. Вхідна та вихідна напруги зазвичай, але не завжди, обмежуються напругою живлення пристрою з GPIO і можуть бути пошкоджені більшою напругою.

Стан порту GPIO можна визначити програмно, зазвичай через адрес у пам'яті, прив'язаної до конкретного порту, або через спеціальні інструкції для порту вводу-виводу. Також, дуже часто зміну значень на вході GPIO можна зчитувати при визові IRQ (переривань).

SPI – послідовний периферійний інтерфейс. Це інтерфейс послідовної синхронної комунікації, що застосовується для комунікації на короткі відстані, що дуже широко потребується саме у системах керування БПЛА. Цей інтерфейс було розроблено компанією Motorola у 1979 році, і його було прийнято як стандарт. У широкому спектрі використання – зазвичай використовується для рідкокристалічних дисплеїв, захищених цифрових карт та комунікації між модулями радіообміну або модемами. У інтерфейсі SPI комунікація проходить у режимі повного дуплексу використовуючи модель ведучий – ведений (master-slave). Зазвичай, ведучим може бути тільки один пристрій, що з'єднаний з багатьма веденими. (хоча деякі пристрої підтримують зміну ведомого та веденого на ходу, в залежності від лінії ChipSelect). Ведучий створює фрейм для запису та зчитування, та обирає ведених, за допомогою відповідних сигналів ChipSelect (CS, в деяких специфікаціях – SS).

SPI шина визначає 4 логічні сигнали:

1. SCLK – SerialClock. Сигнал синхронізації від ведучого
2. MOSI – Master OutputSlaveInput. Сигнал даних від ведучого.
3. MISO –Master Input Slave Output.Сигнал даних від веденого.
4. CS/SS – Chip/Slave Select. Сигнал вибору мікросхеми, вибирає ведену

мікросхему, яка повинна обробляти сигнал по SPI інтерфейсу

Шина SPI може працювати у режимі з одним ведучим та одним (рис. 2.1.) або декількома веденими пристроями (рис. 2.2. і рис. 2.3).

Якщо використовується один ведений пристрій, лінія SS переходить у логічний рівень 0, якщо ведений пристрій це дозволяє. Деяким веденим пристроям потрібен спадаючий фронт сигналу, щоб викликати ініціалізацію. З кількома веденими пристроями, для незалежного режиму роботи, потрібно використовувати відокремлені SS сигнали.

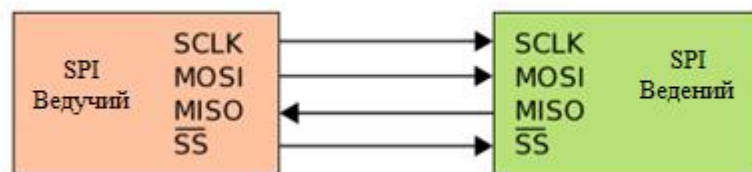


Рис.2.1. Приклад використання SPI з одним веденим.

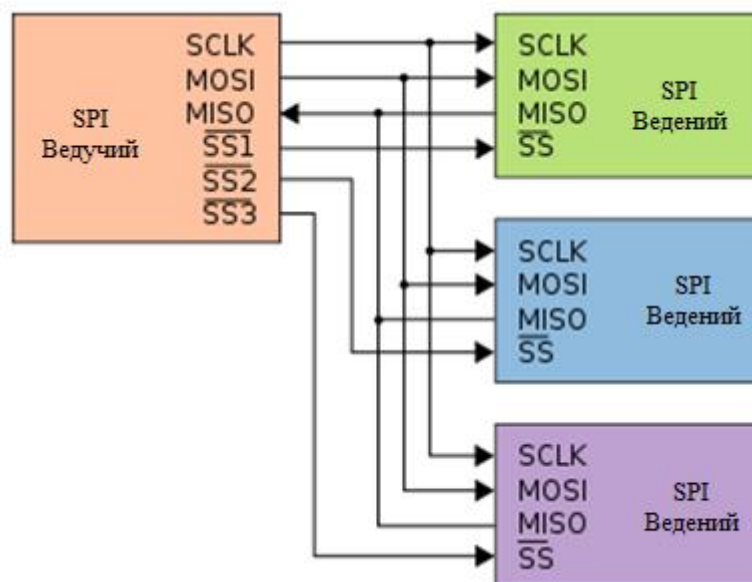


Рис.2.2. Приклад використання SPI з 3-ма незалежними (паралельними) веденими

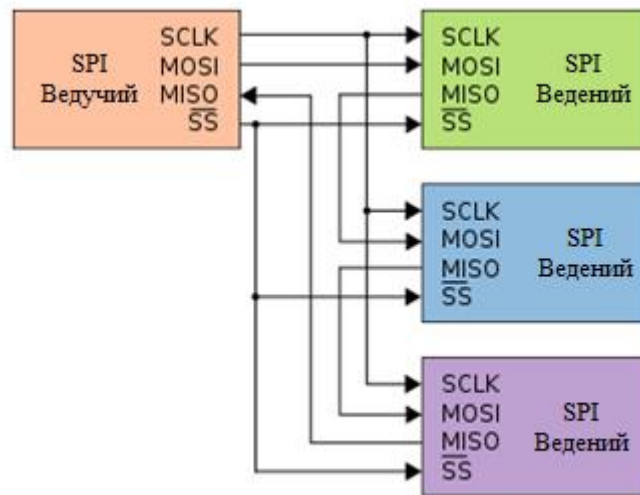


Рис.2.3. Приклад використання SPI з 3-ма залежними (послідовними) веденими

Щоб розпочати обмін даними, ведучий пристрій налаштовує сигнал синхронізації на частоту, яку підтримує ведений пристрій, зазвичай це декілька МГц (на мікроконтролерах найчастіше використовують $\frac{f_{ck}}{4}$, $\frac{f_{ck}}{8}$, $\frac{f_{ck}}{16}$ і т.п., де f_{ck} — частота осцилятора мікроконтролера). Потім, ведучий пристрій обирає один або більше ведених пристроїв, подаючи на відповідні рівні логічний 0. Якщо потрібен період очікування, наприклад для аналого-цифрового перетворення, ведений пристрій повинен зачекати принаймні цей період часу перед тим, як видавати тактові цикли.

Під час кожного тактового циклу SPI відбувається повнодуплексна передача даних. Ведучий пристрій надсилає біт по лінії MOSI, і ведений зчитує його, в той час як ведений надсилає біт по лінії MISO, і ведучий зчитує його. Ця послідовність зберігається, навіть якщо передбачається передача даних лише в одному напрямку.

Передачі зазвичай включають два регістри зсуву певного заданого розміру слова, наприклад вісім біт, один у ведучому, а інший у веденому, вони з'єднані у віртуальні кільцеву топологію. Дані зазвичай зсуваються по спаданню значимості біта. На фронті тактового сигналу і ведучий, і ведений трохи зсуваються та виводять його на лінію передачі на відповідну сторону. На наступному фронті синхронізації в кожному приймачі біт вибирається з лінії передачі та встановлюється як новий молодший біт регістра зсуву. Після того, як біти регістра були зміщені і введені, ведучий і ведений пристрої обмінялися значеннями регістрів. Якщо потрібно

обмінятися додатковими даними, регістри зсуву перезавантажуються, і процес повторюється. Передача може тривати протягом будь-якої кількості тактів. Після завершення ведучий припиняє перемикання тактового сигналу та зазвичай скасовує вибір веденого. Передачі часто складаються з восьмирозрядних слів. Однак також поширені інші розміри слів, наприклад, шістнадцятирозрядні слова для контролерів сенсорних екранів або аудіокодеків, таких як TSC2101 від TexasInstruments, або дванадцятирозрядні слова для багатьох цифро-аналогових або аналогово - цифрових перетворювачів. Кілька пристроїв SPI також можуть бути підключені послідовно для збереження контактів. Кожен підлеглий пристрій на шині, який не був активований за допомогою своєї лінії вибору мікросхеми (CS/SS), повинен ігнорувати вхідний тактовий сигнал і сигнали MOSI і не повинен керувати MISO (тобто повинен мати вихід із трьох станів), хоча для реалізації цього деяким пристроям потрібні зовнішні буфери з трьома станами.

На додаток до налаштування тактової частоти, ведучий також повинен налаштувати полярність синхронізації та фазу щодо даних. Motorola SPI BlockGuide [21] називає ці два параметри CPOL і CPHA (для полярності синхросигналу та фази) відповідно, які також прийняли більшість постачальників.

CPOL визначає полярність синхросигналу. Полярності можна перетворити за допомогою простого інвертора:

- CPOL=0 – це тактовий сигнал, який не працює на 0, і кожен цикл складається з імпульсу 1. Тобто передній фронт – це наростаючий фронт, а задній – спадаючий.
- CPOL=1 – це тактовий сигнал, який не працює на 1, і кожен цикл складається з імпульсу 0. Тобто передній фронт – це спадаючий фронт, а задній фронт – наростаючий.

CPHA визначає синхронізацію (тобто фазу) бітів даних відносно тактових імпульсів. Перетворення між цими двома формами є нетривіальним:

- Для CPHA=0 «вихідна» сторона змінює дані на задньому фронті попереднього тактового циклу, тоді як «вхідна» сторона фіксує дані на передньому фронті тактового циклу (або відразу після нього). Зовнішня сторона зберігає дані

дійсними до заднього фронту поточного тактового циклу. Для першого циклу перший біт має бути на лінії MOSI перед переднім фронтом синхронізації. Альтернативний спосіб розгляду полягає в тому, що цикл $CPHA=0$ складається з половини циклу з синхросигналу режимі очікування, за яким слідує половина циклу з активованим синхросигналом.

- Для $CPHA=1$ «вихідна» сторона змінює дані на передньому фронті поточного такту, тоді як «вхідна» сторона фіксує дані на (або відразу після) заднього фронту тактового циклу. Зовнішня сторона зберігає дані дійсними до переднього фронту наступного такту. Протягом останнього циклу ведений пристрій утримує лінію MISO дійсним, доки не буде скасовано вибір веденого. Альтернативний спосіб розгляду полягає в тому, що цикл $CPHA=1$ складається з половини циклу із заявленим синхросигналом, за яким слідує половина циклу з синхросигналом режимі очікування.

Сигнали MOSI та MISO зазвичай стабільні (у точках прийому) протягом півперіоду до наступного переходу синхронізації. Ведучий і ведений пристрої SPI цілком можуть відбирати дані в різні моменти цього півциклу. Це додає більше гнучкості каналу зв'язку між ведучим і веденим.

Комбінації полярності та фаз часто називають режимами, які зазвичай нумерують відповідно до наступної угоди, де $CPOL$ є старшим бітом, а $CPHA$ – молодшим (рис. 2.4).

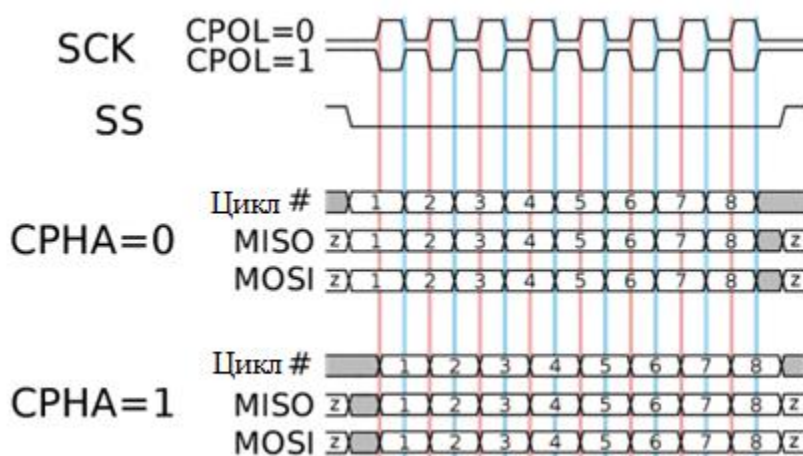


Рис.2.4. Часова діаграма SPI інтерфейсу

В режимі повного дуплексу головний пристрій може передавати та приймати в різних режимах. Наприклад, він може передавати в режимі 0 і приймати в режимі 1 одночасно.

Конфігурація з незалежними веденими. У конфігурації незалежного веденого пристрою існує незалежна лінія вибору мікросхеми для кожного веденого пристрою. Таким чином зазвичай використовується SPI. Ведучий затверджує вибір лише однієї мікросхеми за раз.

Підтягувальні резистори між джерелом живлення та лініями вибору мікросхеми рекомендуються для систем, де контакти вибору головної мікросхеми можуть за замовчуванням перебувати в невизначеному стані. Коли окремі програми програмного забезпечення ініціалізують кожну мікросхему, вибирають і зв'язуються з її веденими, підтягуючі резистори запобігають відповіді інших неініціалізованих ведених.

Оскільки контакти MISO ведених пристроїв з'єднані разом, вони повинні бути контактами з трьома станами (високим, низьким або високим імпедансом), де високоімпедансний вихід повинен застосовуватися, коли підлеглий пристрій не вибрано. Ведені пристрої, які не підтримують три стани, можна використовувати в незалежній підлеглий конфігурації шляхом додавання мікросхеми буфера трьох станів, керованої сигналом вибору мікросхеми. (Оскільки лише одна сигнальна лінія повинна бути тристатистичною для кожного підпорядкованого пристрою, одна типова стандартна логічна мікросхема, яка містить чотири буфери трьох станів з незалежними входами затвора, може бути використана для підключення до чотирьох підлеглих пристроїв до шини SPI)

Конфігурація послідовного ланцюга. Деякі продукти, які реалізують SPI, можуть бути з'єднані в шлейфовому ланцюжку, при цьому перший ведений вихід підключається до другого веденого входу тощо. Порт SPI кожного веденого пристрою призначений для надсилання під час другої групи тактових імпульсів точної копії дані, отримані під час першої групи тактових імпульсів. Весь ланцюг діє як регістр зсуву зв'язку; Шлейфове з'єднання часто виконується за допомогою регістрів зсуву, щоб забезпечити банк входів або виходів через SPI. Кожен ведений

пристрій копіює вхідний сигнал у вихідний сигнал у наступному такті, доки активна низька лінія SS не перейде у високий рівень. Така функція вимагає лише однієї лінії SS від ведучого, а не окремої лінії SS для кожного веденого.

Інші додатки, які потенційно можуть взаємодіяти з SPI і потребують конфігурації послідовного ланцюга, включають SGPIO, JTAG і інтерфейс Two-Wire.

Конфігурація розширювача. Інша варіація використовує рівно дві вибрані мікросхеми. Один чіп керує блоком логіки вибору, інший маршрутизується логікою вибору. Застосування досить поширене, тому існують мультиплексори з послідовним керуванням. Це може стандартизувати роз'єм і бути готовим до майбутнього, щоб контролер міг підтримувати багато пристроїв зі зміною програмного забезпечення. Подібна програма поєднує послідовний керований мультиплексор із контролером USB-SPI, керованим ПК або смартфоном. Це дозволяє керувати багатьма типами “примітивних” електронних пристроїв за допомогою недорогих комп'ютерів масового виробництва.

Модифікації високої надійності. У середовищах з електричним шумом стандарт SPI має мало сигналів, і може бути досить доречно і економічно зменшити вплив синфазного шуму шляхом адаптації SPI для використання диференціальної сигналізації низької напруги. Ще одна перевага полягає в тому, що керовані пристрої можуть бути розроблені для зворотного зв'язку для перевірки цілісності сигналу.

Дійсні комунікації. Деякі ведені пристрої розроблені таким чином, щоб ігнорувати будь-який зв'язок SPI, у якому кількість тактових імпульсів перевищує вказану. Інші не звертають уваги, ігноруючи додаткові входи та продовжуючи зміщувати той самий вихідний біт. Для різних пристроїв зазвичай використовують зв'язок SPI різної довжини, як, наприклад, коли SPI використовується для доступу до ланцюжка сканування цифрової ІС шляхом видачі командного слова одного розміру (можливо, 32 біти), а потім отримання відповіді іншого розміру (можливо, 153 біти, по одному для кожного контакту в цьому ланцюжку сканування).

Переривання. Пристрої SPI іноді використовують іншу сигнальну лінію для надсилання сигналу переривання до центрального процесора. Приклади включають

переривання від датчиків сенсорного екрана, сповіщення про температурні обмеження від датчиків температури, сигнали тривоги, видані чіпами годинника реального часу, SDIO і підключення до гнізда гарнітури від звукового кодека в мобільному телефоні. Переривання не охоплюються стандартом SPI, їх використання не заборонено і не передбачено стандартом. Іншими словами, переривання виходять за рамки стандарту SPI і реалізуються незалежно від нього.

Дизайн програмного забезпечення для SPI. SPI можна програмно трактувати як "драйвер шини". Програмне забезпечення для підключених пристроїв написано для виклику «драйвера шини», який обробляє фактичне низькорівневе обладнання SPI. Це дозволяє коду драйвера для підключених пристроїв легко переносити на інше обладнання, включно з розрядним дизайном.

Переваги:

1. Повний дуплексний зв'язок по стандарту.
2. Двухтактні драйвери (на відміну від відкритих стоків) забезпечують високу цілісність сигналу та швидкість.
3. Вища пропускна здатність, ніж I2C або SMBus. Не обмежується будь-якою максимальною тактовою частотою, що забезпечує потенційно високу швидкість.
4. Повна гнучкість протоколу для переданих бітів.
5. Не обмежуючись 8-бітними словами.
6. Довільний вибір розміру, змісту та мети даних.
7. Надзвичайно простий апаратний інтерфейс.
8. Як правило, нижчі вимоги до потужності, ніж I2C або SMBus, через меншу кількість схем (включаючи підтягуючі резистори).
9. Немає арбітражу або пов'язаних режимів відмови - на відміну від CAN-шини.
10. Ведені використовують синхросигнал головного і не потребують точних осциляторів.
11. Ведені не потребують унікальної адреси – на відміну від I2C, GPIB або SCSI.

12. Трансивери не потрібні - на відміну від CAN-шини.
13. Використовує лише чотири контакти на корпусах мікросхем і дроти в схемах плати або роз'ємах, набагато менше, ніж у паралельних інтерфейсах.
14. Щонайбільше один унікальний сигнал шини на пристрій (вибір мікросхеми); всі інші є спільними.
15. Сигнали односпрямовані, що забезпечує легку гальванічну ізоляцію.
16. Проста програмна реалізація.

Недоліки:

1. Вимагає більше контактів на корпусах мікроконтролерів, ніж I2C, навіть у трипровідному варіанті.
2. Відсутність внутрішньосмугової адресації; на спільних шинах потрібні позасмугові сигнали вибору мікросхеми.
3. Розширюваність значно зменшується, коли потрібні кілька ведених пристроїв, які використовують різні режими SPI. Доступ сповільнюється, коли ведучий часто потребує повторної ініціалізації в різних режимах.
4. Немає апаратного контролю потоку веденими (але головний може затримати наступний фронт синхронізації, щоб уповільнити швидкість передачі).
5. Немає апаратного підтвердження відведеного (ведучий може передавати в нікуди і не знати про це).
6. Зазвичай підтримує лише один ведучий пристрій (залежить від апаратної реалізації пристрою).
7. Протокол перевірки помилок не визначено.
8. Без формального стандарту перевірка відповідності неможлива.
9. Працює лише на коротких відстанях порівняно з RS-232, RS-485 або CAN-шиною.
10. Оптоізолятори на шляху сигналу обмежують тактову частоту для передачі MISO через додаткові затримки між синхросигналом і даними.
11. Багато існуючих варіантів, що ускладнює пошук інструментів розробки, таких як адаптери хосту, які підтримують ці варіанти.
12. SPI не підтримує "hotswap" (динамічне додавання вузлів).

13. Переривання повинні бути реалізовані за допомогою позасмугових сигналів або підроблені за допомогою періодичного опитування, подібно до USB 1.1 і 2.0.

14. Деякі варіанти, такі як подвійний SPI, чотири SPI та трипровідні послідовні шини, є напівдуплексними.

Застосування. Порівняно з шиною паралельного вводу/виводу, економія площі плати є значною, і це забезпечило SPI надійну роль у вбудованих системах. Це вірно для більшості системних процесорів, як для 32-розрядних процесорів вищого класу, таких як ті, що використовують ARM, MIPS або PowerPC, так і для інших мікроконтролерів, таких як AVR, PIC і MSP430. Ці мікросхеми зазвичай включають контролери SPI, здатні працювати в режимі ведучого/веденого. Внутрішньосистемні програмовані контролери AVR (включаючи порожні) можна програмувати за допомогою інтерфейсу SPI.

Конструкції на основі мікросхем або FPGA іноді використовують SPI для зв'язку між внутрішніми компонентами, розташування на чіпі може коштувати так само дорого, як і розташування на платі.

Можливість повного дуплексу робить SPI дуже простим і ефективним для застосувань з одним ведучим/одним веденим. Деякі пристрої використовують повнодуплексний режим для реалізації ефективного, швидкого потоку даних для таких програм, як цифрове аудіо, цифрова обробка сигналів або телекомунікаційні канали, але більшість готових чіпів дотримуються напівдуплексних протоколів запиту/відповіді.

SPI використовується для комунікації з різними периферійними пристроями, такими як:

- Датчики: температури, тиску, АЦП, екрани, контролери відеоігор.
- Прилади управління: аудіокодеки, цифрові потенціометри, ЦАП.
- Об'єктиви камери.
- Комунікації: Ethernet, USB, USART, CAN, IEEE 802.15.4, IEEE 802.11.
- Пам'ять: flash і EEPROM.
- Годинники реального часу.

- ПК-дисплей, іноді навіть для керування даними зображення.
- Будь-яка карта MMC або SD (включаючи варіант SDIO).

У високопродуктивних системах FPGA іноді використовують SPI для взаємодії як веденого пристрою із хостом, як ведучий із датчиками або для флеш-пам'яті, яка використовується для завантаження, якщо вони засновані на SRAM.

Стандарти. Шина SPI є стандартом де-факто. Однак відсутність формального стандарту відображається у великій різноманітності варіантів протоколу. Часто зустрічаються різні розміри слів. Кожен пристрій визначає свій власний протокол, включаючи те, чи він взагалі підтримує команди. Деякі пристрої призначені лише для передачі; інші призначені лише для отримання. Сигнал вибору мікросхеми(CS/SS) іноді активний високий, а не активний низький. Деякі протоколи надсилають молодший біт першим.

Інструменти розробки. Існує ряд апаратних рішень USB, які забезпечують комп'ютери, що працюють під керуванням Linux, Mac або Windows, можливості SPI ведучого або веденого. Багато з них також надають можливості створення сценаріїв або програмування (VisualBasic, C/C++, VHDL тощо).

Хост-адаптер SPI дозволяє користувачеві виконувати роль ведучого на шині SPI безпосередньо з ПК. Вони використовуються для тестування, програмування та налагодження вбудованих систем, мікросхем (FPGA, ASIC і SoC).

Ключовими параметрами SPI є: максимальна підтримувана частота для послідовного інтерфейсу, затримка між командами та максимальна довжина для команд SPI. Сьогодні на ринку можна знайти адаптери SPI, які підтримують послідовні інтерфейси до 100 МГц з практично необмеженою довжиною доступу.

Оскільки протокол SPI є стандартом де-факто, деякі хост-адаптери SPI також мають можливість підтримувати інші протоколи, крім традиційного 4-провідного SPI (наприклад, підтримку протоколу quad-SPI або іншого спеціального послідовного протоколу, який походить від SPI).

Також, можна використовувати спеціальні аналізатори протоколу - Аналізатори протоколів SPI — це інструменти, які обирають шину SPI та декодують

електричні сигнали, щоб забезпечити більш якісне уявлення про дані, що передаються по конкретній шині.

Щодо осцилографів - Більшість постачальників осцилографів пропонують декодування протоколу для SPI. Більшість підтримують 2-, 3- та 4-провідний SPI. Можливість запуску та декодування зазвичай пропонується як додаткова функція. Доступ до сигналів SPI можна отримати через канали аналогового осцилографа або цифрові канали MSO.

Логічні аналізатори - Під час розробки чи усунення несправностей шини SPI дослідження апаратних сигналів може бути дуже важливим. Логічні аналізатори – це інструменти, які збирають, аналізують, декодують і зберігають сигнали, щоб була можливість переглядати високошвидкісні сигнали. Логічні аналізатори відображають мітки часу кожної зміни рівня сигналу, що може допомогти знайти проблеми протоколу. Більшість логічних аналізаторів мають можливість декодувати сигнали шини в дані протоколу високого рівня та показувати дані ASCII.

Отже, проаналізувавши переваги та недоліки інтерфейсу SPI, можна зробити висновок, що даний протокол можна досить зручно та доречно використовувати для комунікації головного контролера для керування БПЛА з модулем антени, акселерометрами та будь-якими іншими сенсорами, де швидкість передачі даних є важливою, не зважаючи на їх консистентність. Наприклад, можна використати nrf24l01 від NordicSemiconductors як трансивер радіосигналу, цей модуль підтримує повний стандарт інтерфейсу SPI.

I²C (Inter-Integrated Circuit. Частіше у документації *I²C*, іноді ІІС) – це синхронна шина зв'язку з декількома контролерами/багатьма цілями (ведучий/ведений), одностороння шина зв'язку з комутацією пакетів, винайдена в 1982 р. компанією Philips Semiconductors. Він широко використовується для підключення низькошвидкісних периферійних мікросхем до процесорів і мікроконтролерів у зв'язку між платами на короткій відстані.

Системна шина керування (SMBus), визначена Intel у 1995 році, є підмножиною I²C, що визначає суворіше використання. Однією з цілей SMBus є сприяння надійності та сумісності. Відповідно, сучасні системи I²C включають

деякі політики та правила з SMBus, іноді підтримуючи як I2C, так і SMBus, вимагаючи лише мінімальної реконфігурації шляхом командування або використання вихідного контакту.

I2C використовує лише дві двонаправлені лінії з відкритим колектором або відкритим стоком: лінію послідовної передачі даних (SDA) і лінію послідовного синхронізації (SCL), підтягнуту за допомогою резисторів. Зазвичай використовуються напруги +5 В або +3,3 В, хоча допускаються системи з іншими напругами.

Еталонний дизайн I2C має 7-бітний адресний простір із рідко використовуваним 10-бітним розширенням [22]. Звичайними швидкостями шини I2C є стандартний режим 100 кбіт/с і швидкий режим 400 кбіт/с (Табл. 2.3). Існує також режим низької швидкості 10 кбіт/с, але також допускаються довільно низькі тактові частоти. Пізніші версії I2C можуть розміщувати більше вузлів і працювати на вищих швидкостях (400 кбіт/с швидкий режим, 1 Мбіт/с швидкий режим плюс, 3,4 Мбіт/с високошвидкісний режим і 5 Мбіт/с надшвидкий режим). Ці швидкості ширше використовуються у вбудованих системах, ніж у ПК.

Дані бітрейти вказані для передачі між контролером (ведучим) і цільовим (веденим) без розтягування тактової частоти чи інших апаратних витрат. Додаткові витрати протоколу включають цільову адресу та, можливо, адресу реєстру в цільовому пристрої, а також біти ACK/NACK на кожен переданий байт. Таким чином, фактична швидкість передачі користувальницьких даних є нижчою, ніж швидкість передачі бітів в цілому. Наприклад, якщо кожна взаємодія з ціллю неефективно дозволяє передати лише 1 байт даних, швидкість передачі даних буде менше половини пікової швидкості передачі даних.

Кількість вузлів, які можуть існувати на даній шині I2C, обмежена адресним простором, а також загальною ємністю шини 400 пФ, що обмежує практичну відстань зв'язку кількома метрами. Відносно високий імпеданс і низька завадостійкість вимагають загального потенціалу заземлення, що знову ж таки обмежує практичне використання зв'язком в межах однієї друкованої плати або невеликої системи плат.

Таблиця 2.3.

Режими I2C

Режим	Максимальна швидкість	Максимальна ємність	Тип вихідного з'днання	Напрямок
Стандартний (Sm)	100 кбіт/с	400 пФ	Відкритий сток	Двонаправлений
Швидкий (Fm)	400 кбіт/с	400 пФ	Відкритий сток	Двонаправлений
Швидкий + (Fm+)	1 Мбіт/с	550 пФ	Відкритий сток	Двонаправлений
Надшвидкий (Hs)	1.7Мбіт/с	400 пФ	Відкритий сток	Двонаправлений
Надшвидкий + (Hs+)	3.4Мбіт/с	100 пФ	Відкритий сток	Двонаправлений
Ультрашвидкий (UFm)	5Мбіт/с	-	Двотактний вихід	Однонаправлений

Еталонна схема.

Згадана еталонна конструкція являє собою шину з лініями синхронізації (SCL) і даних (SDA) з 7-розрядною адресацією. Шина має дві ролі для вузлів: контролер (ведучий) або цільовий (ведений):

- Контролер (ведучий) вузол: вузол, який генерує синхросигнал і ініціює зв'язок із цілями (веденими).
- Цільовий (веденими) вузол: вузол, який отримує тактовий сигнал і відповідає, коли до нього звертається контролер (ведучий).

Шина містить в собі декілька контролерів, що означає, що може бути присутня будь-яка кількість вузлів контролера. Крім того, контролер і цільові ролі можуть змінюватися між повідомленнями (після надсилання STOP).

Може бути чотири потенційні режими роботи для даного пристрою, хоча більшість пристроїв використовують лише одну роль і два її режими:

- Передача контролера (ведучого): Вузол контролера надсилає дані цільовому (веденому).
- Отримання контролера (ведучого): вузол контролера отримує дані від цільового (веденому).
- Цільова (ведена) передача: цільовий вузол надсилає дані до контролера (ведучого).
- Цільовий (ведений) прийом: цільовий вузол отримує дані від контролера (ведучого).

На додаток до 0 і 1 бітів даних, шина I2C допускає спеціальні сигнали START і STOP, які діють як розділювачі повідомлень і відрізняються від бітів даних. (Це відрізняється від початкових та стопових бітів, що використовуються в асинхронному послідовному зв'язку, які відрізняються від бітів даних лише синхронізацією.).

Спочатку контролер перебуває в режимі передачі, надсилаючи START, за яким слідує 7-бітна адреса цілі, з якою він бажає взаємодіяти, за яким, нарешті, слідує один біт, що вказує, який режим слід використовувати для комунікації: 0 – Write (запис) або 1 - Read (зчитування).

Якщо контролер з заданою адресою існує на шині, тоді він відповість бітом ACK (активний низький для підтвердження) для цієї адреси. Потім контролер продовжує роботу в режимі передачі або прийому (відповідно до біта запису/читання, який він надіслав), а ціль продовжує роботу в додатковому режимі (відповідно прийом або передача).

Байти адреси та даних надсилаються першими старшими бітами. Початкова умова вказується переходом від високого до низького SDA з високим SCL; умова зупинки вказується переходом SDA від низького до високого з високим SCL. Всі інші переходи SDA відбуваються з SCL low.

Якщо контролеру потрібно записати в ціль, він повторно надсилає байт з адресою та режимом, приймаючи біт ACK від цілі. (У цій ситуації контролер перебуває в режимі передачі контролера, а ціль — у режимі прийому цілі.)

Якщо контролеру потрібно прочитати з цілі, він по чергово отримує байт від цільового об'єкта, при цьому контролер надсилає біт АСК після кожного байта, крім останнього. (У цій ситуації контролер перебуває в режимі прийому контролера, а ціль — у режимі передачі інформації.)

Транзакція I2C може складатися з кількох повідомлень. Контролер завершує повідомлення умовою STOP, якщо це кінець транзакції, або він може надіслати іншу умову START, щоб зберегти контроль над шиною для іншого повідомлення (транзакція «комбінованого формату»).

Протоколи повідомлень. I2C визначає основні типи транзакцій, кожна з яких починається з START і закінчується STOP:

- Одне повідомлення, де контролер (ведучий) записує дані в цільовий (ведений).
- Одне повідомлення, де контролер (ведучий) зчитує дані з цільового (ведений).
- Комбінований формат, у якому контролер (ведучий) виконує принаймні два зчитування або запис до одного або кількох цілей (ведених).

У комбінованій транзакції кожне читання або запис починається з START і цільової адреси. Умовою START після першої також називають повторними бітами START. Повторюваним START не передують умови STOP, завдяки чому цілі знають, що наступне повідомлення є частиною тієї самої транзакції.

Будь-яка ціль відповідатиме лише на певні повідомлення, які зазначено в документації продукту.

На практиці більшість цілей використовують моделі керування запит-відповідь, де один або більше байтів після команди запису розглядаються як команда або адреса. Ці байти визначають, як обробляються наступні записані байти або як ціль реагує на наступне читання. Більшість операцій SMBus включають однобайтові команди.

На **фізичному рівні** лінії SCL і SDA мають конструкцію шини з відкритим стоком (MOSFET) або з відкритим колектором (BJT), тому для кожної лінії потрібен підтягуючий резистор (рис.2.5).

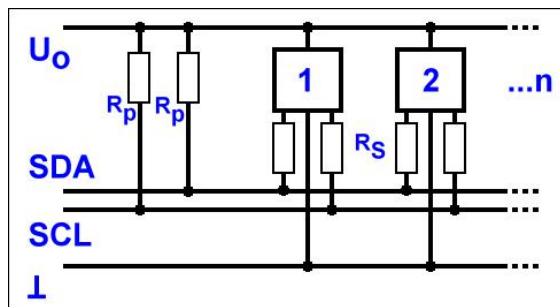


Рис.2.5. Фізична реалізація I2C

Логічний «0» виводиться шляхом підтягування лінії до землі, а логічна «1» виводиться шляхом дозволу лінії плавати (вихідний високий імпеданс), щоб підтягуючий резистор підтягував її до високого рівня. Лінія ніколи не піднімається активно. Таке підключення дозволяє підключити кілька вузлів до шини без коротких замикань через конфлікт сигналів. Високошвидкісні системи (і деякі інші) можуть використовувати джерело струму замість резистора для підтягування лише SCL або обох SCL і SDA, щоб забезпечити більшу ємність шини та забезпечити швидший час наростання.

Важливим наслідком цього є те, що кілька вузлів можуть керувати лініями одночасно. Якщо будь-який вузол керує низкою лінії, він буде низьким. Вузли, які намагаються передати логічний вузол (тобто дозволяючи лінії плавати на високому рівні), можуть виявити це та зробити висновок, що інший вузол активний одночасно.

Якщо використовується на SCL, це називається розтягуванням годинника та є механізмом керування потоком для цілей. При використанні на SDA це називається арбітражем і гарантує наявність лише одного передавача за раз.

Під час простою обидві лінії мають високий рівень. Щоб розпочати транзакцію, SDA знижується, а SCL залишається високим. Небажано передавати стоп-маркер, відпускаючи SDA, щоб знову перевестись на високий рівень (хоча таке «порожнє повідомлення» зазвичай нешкідливе), тому наступним кроком є переведення SCL на низький рівень.

За винятком сигналів запуску та зупинки, лінія SDA змінюється лише тоді, коли синхросигнал на низькому логічному рівні. Передача біта даних складається з

високого імпульсу тактової лінії, утримуючи лінію даних стабільною на бажаному рівні.

Коли SCL низький, передавач (спочатку контролер) встановлює SDA на потрібне значення та (після невеликої затримки, щоб дати значенню поширитися) дозволяє SCL почати наблизитись до високого рівня. Потім контролер чекає, поки SCL дійсно стане високим; це буде затримано на кінцевий час наростання сигналу SCL (постійна часу RC підтягуючого резистора та паразитна ємність шини) і може бути додатково затримано розтягуванням синхросигналу цілі.

Коли SCL досягає високого рівня, контролер чекає мінімальний час (4 мкс для стандартної швидкості I2C), щоб переконатися, що приймач отримав біт, а потім знову знижує його. На цьому передача одного біта завершена.

Після кожних 8 бітів даних в одному напрямку біт «підтвердження» передається в іншому напрямку. Передавач і приймач міняються ролями на один біт, а вихідний приймач передає назад один біт «0» (ACK). Якщо передавач замість цього бачить біт «1» (NACK), він дізнається, що:

- (Якщо контролер передає на ціль) Ціль не може прийняти дані. Немає такої цілі, команда не зрозуміла або не може прийняти більше даних.
- (Якщо ціль передає до контролера) Контролер бажає припинити передачу після цього байта даних.

Лише лінія SDA змінює напрямок під час бітів підтвердження, SCL завжди контролюється контролером.

Після біта підтвердження лінія тактового сигналу низька, і контролер може виконати одну з трьох дій:

- Почати передачу ще одного байта даних: передавач встановлює SDA, а контролер імпульсує SCL на високому рівні.
- Надіслати STOP: встановити SDA на низький рівень, дозволити SCL підвищитись, потім дозволити SDA підвищитись. Це звільняє шину I2C.
- Надіслати START: встановити високий рівень SDA, дати SCL стати високим, а потім знову встановити низький рівень SDA. Це запускає нове повідомлення шини I2C без звільнення шини.

Розтягування синхросигналу за допомогою SCL:Однією з найбільш важливих особливостей протоколу I2C є розтягування синхросигналу. Адресований цільовий пристрій може утримувати низький рівень тактової лінії (SCL) після отримання (або надсилання) байта, вказуючи на те, що він ще не готовий обробляти більше даних. Контролер, який взаємодіє з ціллю, може не завершити передачу поточного біта, але повинен зачекати, поки лінія тактового сигналу фактично стане високим. Якщо ціль розтягує тактову частоту, тактова лінія все одно буде низькою (оскільки з'єднання мають відкритий стік). Те ж саме вірно, якщо другий, повільніший, контролер намагається керувати синхросигналом одночасно. (Якщо є більше ніж один контролер, усі, крім одного, зазвичай програють у швидкості.)

Контролер повинен зачекати, доки лінія тактового сигналу не буде переходити на високий рівень, і додатковий мінімальний час (4 мкс для стандартного 100 кбіт/с I2C), перш ніж знову знизити рівень тактового сигналу.

Хоча контролер також може тримати лінію SCL на низькому рівні скільки завгодно (це заборонено з версії 6 протоколу – підрозділ 3.1.1), термін “розтягування синхросигналу” зазвичай використовується лише тоді, коли це роблять цілі. Хоча теоретично будь-який тактовий імпульс може бути розтягнутим, зазвичай використовуються інтервали до або після біта підтвердження. Наприклад, якщо метою є мікроконтролер, його інтерфейс I2C може розтягувати синхросигнал після кожного байта, поки програмне забезпечення не вирішить, надсилати позитивне підтвердження чи NACK.

Розтягування синхросигналу – це єдиний час в I2C, коли ціль керує SCL. Багатьом цілям не потрібно розтягувати тактовий сигнал і, таким чином, сприймати SCL як суто вхідний сигнал без схем для його керування. Деякі контролери, наприклад ті, що знаходяться в користувальницьких ASIC, можуть не підтримувати розтягування тактової частоти, часто ці пристрої будуть позначені як "двопровідний інтерфейс", а не як I2C.

Існує кілька можливих **режимів роботи** для зв'язку I2C. Усі вони сумісні, оскільки завжди можна використовувати стандартний режим 100 кбіт/с, але

поєднання пристроїв із різними можливостями на одній шині може спричинити такі проблеми:

- Швидкий режим сумісний і просто посилює кілька параметрів синхронізації для досягнення швидкості 400 кбіт/с. Швидкий режим широко підтримується цільовими пристроями I2C, тому контролер може використовувати його, якщо він знає, що ємність шини та сила підтягування дозволяють це.

- Швидкий режим $+(Fm+)$ досягає до 1 Мбіт/с за допомогою потужніших (20 мА) драйверів і підтягувальних резисторів для досягнення швидшого часу наростання та спаду. Сумісність з пристроями в стандартному та швидкому режимах (з можливістю скидання 3 мА) може бути досягнута, якщо є спосіб зменшити силу підтягувань під час розмови з ними.

- Надшвидкий режим (3,4 Мбіт/с) сумісний із звичайними пристроями I2C на тій самій шині, але вимагає, щоб контролер мав активне підтягування на лінії синхронізації, яке ввімкнено під час високошвидкісних передач. Перший біт даних передається зі звичайним переднім фронтом синхронізації з відкритим стоком, який може бути розтягнутим. Для решти семи бітів даних і АСК контролер встановлює високий сигнал годинника у відповідний час, і мета може не розтягнути його. Усім високошвидкісним передачам передують однобайтовий «код контролера» на швидкій або стандартній швидкості. Цей код служить трьома цілями:

1. повідомляє високошвидкісним цільовим пристроям перейти на високошвидкісні правила синхронізації;

2. гарантує, що пристрої з високою або стандартною швидкістю не намагатимуться взяти участь у передачі (оскільки це не збігається з їх адресою);

3. оскільки режим ідентифікує контролер (є вісім кодів контролера, і кожен контролер повинен використовувати окремий), то він гарантує, що арбітраж буде завершено до високошвидкісної частини передачі, тому для високошвидкісної частини не потрібно враховувати ця здатність.

- Ультрашвидкий режим – це, по суті, підмножина I2C лише для запису, яка несумісна з іншими режимами, за винятком того, що його підтримку легко додати до існуючого апаратного дизайну інтерфейсу I2C. Дозволяється

використовувати лише один контролер, який постійно керує лініями передачі даних для досягнення швидкості передачі 5 Мбіт/с. Розтягнення синхросигналу, арбітраж, читання переказів і підтвердження – усе це ігнорується. В основному він призначений для анімованих світлодіодних дисплеїв, де помилка передачі спричинить лише несуттєвий короткий візуальний збій. Схожість з іншими режимами шини I2C обмежується:

1. умови початку та зупинки використовуються для розмежування передач;
2. адресація I2C дозволяє кільком цільовим пристроям спільно використовувати шину без сигналів вибору цілі в стилі шини SPI;
3. дев'ятий тактовий імпульс надсилається на кожен переданий байт, позначаючи положення невикористаних бітів підтвердження.

Деякі виробники пропонують також нестандартний режим Turbo зі швидкістю до 1,4 Мбіт/с. У всіх режимах тактова частота контролюється контролером (контролерами), а шина, яка довша за звичайну, може працювати на швидкості, нижчій за номінальну, шляхом зниження частоти.

Фізичне з'єднання I2C. I2C популярний для підключення периферійних схем до прототипів систем, таких як Arduino та RaspberryPi. I2C не використовує стандартизований роз'єм, однак розробники плати створили різні схеми підключення для з'єднань I2C. Щоб мінімізувати можливі збитки через підключення 0,1-дюймових роз'ємів назад, деякі розробники запропонували використовувати з'єднання сигналу та живлення за такими схемами проводки: (GND, SCL, VCC, SDA) або (VCC, SDA, GND, SCL)[23].

Переважна більшість додатків використовує I2C у тому вигляді, у якому він був спочатку розроблений — периферійні мікросхеми, підключені безпосередньо до процесора на одній друкованій платі, і, отже, на відносно короткій відстані менше 30 см без роз'єму. Однак, використовуючи диференціальний драйвер, альтернативна версія I2C може обмінюватися даними на відстані до 20 метрів (можливо, понад 100 метрів) через CAT5 або інший кабель [24].

Таблиця станів ліній (Табл. 2.4-2.6) показують різні атомарні стани та бітові операції, які можуть відбуватися під час повідомлення I2C.

Таблиця. 2.4

Таблиця станів ліній №1

Тип	Неактивна шина (N)	Старт (S)	Очікування (I)	Стоп (P)	Розтягування синхросигналу (CS)
Примітка	Вільно до зайняття	Зайняття шини (контролер)	Шина зайнята (контролер)	Звільнення шини (контролер)	Утримується ціллю
SDA	Пасивне підтягування	Спадаючий фронт (контролер)	Утримання на низькому рівні (контролер)	Підіймаючий фронт (контролер)	Не важливо
SCL	Пасивне підтягування	Пасивне підтягування	Пасивне підтягування		Утримання на низькому рівні

Таблиця 2.5

Таблиця станів ліній №2

Тип	Відправка одного біту даних		Приймач відсилає бітACK (Отримання байту від відправника)		Приймач відсилає бітNACKbit (Байт не прийнято від відправника)	
	Біт налаштування (Bs)	Готовність до семплування (Bx)	Біт налаштування (Bs)	ACK (A)	Біт налаштування (Bs)	NACK (A')
Примітка	Відправник встановлює біт (контролер/ціль)	Бітзразкаприймача (контролер/ціль)	Відправник у високому імпульсі	Відправник детектує низький SDA	Відправник у високому імпульсі	Відправник детектує високий SDA
SDA	Встановлення біту (після зниження SCL)	Біт захвату (після підняття SCL)	Низький рівень утримується приймачем (після зниження SCL)		Високий рівень утримується приймачем (після падіння SCL)	
SCL	Спадаючий фронт (контролер)	Зростаючий фронт (контролер)	Спадаючий фронт (контролер)	Зростаючий фронт (контролер)	Спадаючий фронт (контролер)	Зростаючий фронт (контролер)

Таблиця 2.6

Таблиця станів ліній №1

Тип	Налаштування сигналу після ACK/NACK			Повторюваний старт (Sr)	
Примітка	Початок після ACK	Ігнорування стану STOP (P)		Початок після NACK	Теж саме, що і START (S) signal
SDA	Був утриманий на низькому рівні для ACK	Зростаючий фронт	Пасивний високий рівень	Пасивний високий рівень	Спадаючий фронт (контролер)
SCL	Спадаючий фронт (контролер)	Утримання на низькому рівні	Зростаючий фронт (контролер)	Пасивний високий рівень	Пасивне підтягування

Структура адресування зведена в Табл. 2.7 та 2.8

Таблиця 2.7

7-бітна адресація

Поле:	S	I2C адресне поле						R/W'	A	I2C послідовність	P	
Тип	START	Байт 1								ACK	Байт X і т.д.... Інші послідовючі повідомлен- ня	STOP
Позиція бітув байтіX								0				
7-бітна адресна позиція												
Примітка		SB					SB	1 = Read зчитування				
								0 = Write запис				

Таблиця 2.8

10-бітна адресація

Поле:	S	10-бітний індикатор	Старше адресне поле	R/W'	A	Молодше адресне поле	I2C послідовність	P
Тип	STA	Байт 1			AC	Байт 2	Байт X і	ST

Позиція біту в байтіX	RT	7	6	5	4	3	2	1	0	K	7	6	5	4	3	2	1	0	т.д.... Інші послідуючі повідомлення	OP
Бітове значення		1	1	1	1	0	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		
10-бітна адресна позиція							10	9												
Примітка		Вказує 10-бітний режим					MSB		1 = Read (зчитування)									LSB		
	0 = Write (запис)																			

Зарезервовані адреса у 7-бітному адресному просторі (Табл. 2.9). Для спеціальних функцій зарезервовано дві групи адрес:

- 0000 XXX
- 1111 XXX

Таблиця 2.9

Зарезервовані адреси у 7-бітному адресному просторі

Зарезервований адресний індекс	8-бітний байт			Опис
	7-бітний адрес		R/W значення	
	MSB (4-біт)	LSB (3-біт)	1-біт	
1	0000	000	0	Загальний виклик
2	0000	000	1	Початковий байт
3	0000	001	X	Адреса CBUS
4	0000	010	X	Зарезервовано для іншого формату шини
5	0000	011	X	Зарезервовано для використання в майбутньому

6	0000	1XX	X	Код контролера режиму HS
7	1111	1XX	1	ID пристрою
8	1111	0XX	X	10-розрядна цільова (підлегла) адресація

Незарезервовані адреси в 7-бітному адресному просторі [25] (Табл. 2.10)

Таблиця 2.10

Незарезервовані адреси у 7-бітному адресному просторі

MSB (4-бітв)	Типове використання
0001	Цифрові приймачі, SMBus
0010	Декодери телевізійної відеолінії, IPMB
0011	AV кодеки
0100	Відеокодери, розширювачі GPIO
0101	ACCESS.bus, PMBus
0110	VESA DDC, PMBus
0111	Контролер дисплея
1000	Обробка телесигналу, обробка звуку, SMBus
1001	AV комутація, АЦП і ЦАП, IPMB, SMBus
1010	Пам'ять, годинник реального часу
1011	AV процесори
1100	PLL та тюнери, модулятори та демодулятори, SMBus
1101	AV процесори та декодери, підсилювачі аудіо потужності, SMBus
1110	AV конвертери кольорового простору

Формат транзакції. Транзакція I2C складається з одного або кількох повідомлень. Кожне повідомлення починається символом початку, а транзакція закінчується символом зупинки. Початкові символи після першого, які починають повідомлення, але не транзакцію, називають повторюваними початковими символами.

Кожне повідомлення читається або записується. Транзакція, що складається з одного повідомлення, називається транзакцією читання або запису. Транзакція, що

складається з кількох повідомлень, називається комбінованою транзакцією. Найпоширенішою формою останнього є повідомлення про запис, що містить інформацію про адресу пристрою, а потім повідомлення про прочитання.

Багато пристроїв I2C не відрізняють комбіновану транзакцію від тих самих повідомлень, надісланих як окремі транзакції, але не всі. Протокол ID пристрою вимагає однієї транзакції; Цілям заборонено відповідати, якщо вони помітили символ зупинки. Режими конфігурації, калібрування або самоперевірки, які спричиняють незвичайну реакцію цілі, також часто автоматично припиняються в кінці транзакції.

Часова діаграма має схематичний вигляд як на рис.2.6.

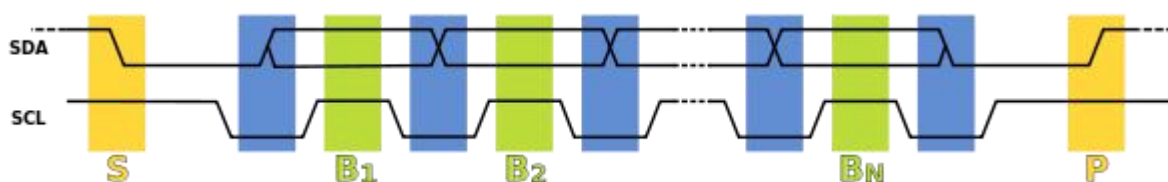


Рис.2.6. Часова діаграма I2C

1. Передача даних ініціюється з початкової умови (S), яка сигналізується SDA, який знижується, тоді як SCL залишається високим.
2. SCL встановлюється на низькому рівні, і SDA встановлює рівень першого біта даних, зберігаючи низький рівень SCL (протягом часу синьої смуги).
3. Дані відбираються (отримуються), коли SCL підвищується для першого біта (B1). Щоб біт був дійсним, SDA не має змінюватися між наростаючим фронтом SCL і наступним спадаючим фронтом (весь час зеленої смуги).
4. Цей процес повторюється, SDA змінюється, коли SCL є низьким, і дані зчитуються, коли SCL є високим (B2 через Bn).
5. Останній біт супроводжується синхронізуючим імпульсом, під час якого SDA підтягується до низького рівня для підготовки до стоп-біта.
6. Умова зупинки (P) сигналізується, коли SCL підвищується, а потім зростає SDA.

Щоб уникнути помилкового виявлення маркера, існує мінімальна затримка між спадаючим фронтом SCL і зміною SDA, а також між зміною SDA і

наростаючим фронтом SCL. Важливо враховувати, що повідомлення I2C, що містить n біт даних (включно з підтвердженнями), містить $n + 1$ тактовий імпульс.

Програмна реалізація. I2C піддається розробці як “драйвер шини”. Програмне забезпечення для підключених пристроїв написано для виклику “драйвер шини”, який обробляє фактичне апаратне забезпечення низького рівня I2C. Це дозволяє коду драйвера для підключених пристроїв легко переносити на інше обладнання, включно з розрядним дизайном.

Інтерфейс I2C підтримується дуже великою кількістю операційних систем, таких як: AmigaOS, Arduino, Maxtime, PICAXE, eCos, ChibiRTOS, FreeBSD, Linux, Windows, Mac OS X, RISC OS

Обмеження. У системах з низьким енергоспоживанням навантажувальні резистори можуть споживати більше енергії, ніж уся решта конструкція разом. На них резистори часто живляться від перемикаючого джерела напруги, наприклад DIO від мікроконтролера. Підтягування також обмежують швидкість шини і мають невелику додаткову вартість. Тому деякі конструктори звертаються до інших послідовностей шин, наприклад I3C або SPI, які не потребують підтягуючих резисторів.

Призначення цільових адрес є слабкою стороною I2C. Сім біт занадто мало, щоб запобігти конфлікту адрес між багатьма тисячами доступних пристроїв. Проблему колізій адрес між різними постачальниками, а також можливість підключатися до кількох ідентичних пристроїв, усуває той факт, що виробники призначають контакти, які можна використовувати для встановлення цільової адреси, для одного з кількох параметрів адреси для кожного пристрою. Два або три контакти є типовими, і в багатьох пристроях є три або більше варіантів підключення на контакт адреси.

10-бітні адреси I2C ще не використовуються широко, і багато операційних систем хостів їх не підтримують. Також не існує складної схеми SMBus "ARP" для динамічного призначення адрес (за винятком плат PCI з наявністю SMBus, для яких це необхідно).

Автоматична конфігурація шини є пов'язаною проблемою. Дана адреса може використовуватися кількома різними протокольно-несумісними пристроями в різних системах, і під час виконання навряд чи можна виявити будь-які типи пристроїв. Наприклад, 0x51 може використовуватися 24LC02 або 24C32 EEPROM з несумісною адресацією; або PCF8563 RTC, який неможливо надійно відрізнити від жодного (без зміни стану пристрою, що може бути недопустимим). Єдині надійні механізми конфігурації, доступні для хостів, включають позасмугові механізми, такі як таблиці, надані мікропрограмою системи, у яких перераховані доступні пристрої. Знову ж таки, цю проблему можна частково вирішити за допомогою ARP у системах SMBus, особливо коли використовуються ідентифікатори постачальника та продукту; але це не дуже прижилося. У версії 3 специфікації I2C додано механізм ідентифікації пристрою.

I2C підтримує обмежений діапазон швидкостей. Хости, що підтримують багатомегабітну швидкість, зустрічаються рідко. Підтримка швидкості $F_m + 1$ Мбіт/с більш поширена, оскільки її електроніка є простими варіантами того, що використовується на менших швидкостях. Багато пристроїв не підтримують швидкість 400 кбіт/с (частково тому, що SMBus ще не підтримує її). Вузли I2C, реалізовані в програмному забезпеченні (замість спеціального апаратного забезпечення), можуть навіть не підтримувати швидкість 100 кбіт/с; тому весь діапазон, визначений у специфікації, рідко використовується. Усі пристрої мають принаймні частково підтримувати найвищу швидкість, інакше вони можуть помилково визначити адресу свого пристрою.

Пристроєм дозволено розтягувати тактові цикли відповідно до їхніх конкретних потреб, що може зменшити пропускну здатність, необхідну для швидших пристроїв, і збільшити затримки під час взаємодії з іншими адресами пристроїв. Ємність шини також обмежує швидкість передачі, особливо коли джерела струму не використовуються для зменшення часу наростання сигналу.

Оскільки I2C є спільною шиною, існує ймовірність того, що будь-який пристрій матиме збій і зависне вся шина. Наприклад, якщо будь-який пристрій утримує низький рівень лінії SDA або SCL, це заважає контролеру надсилати

команди START або STOP для скидання шини. Таким чином, конструкції зазвичай включають сигнал скидання, який забезпечує зовнішній спосіб скидання пристроїв шини. Однак багато пристроїв не мають спеціального контакту для скидання, що змушує розробника включати схеми, щоб дозволити пристрою вимкнути живлення, якщо їх потрібно скинути.

Через ці обмеження (керування адресами, конфігурація шини, потенційні збої, швидкість) деякі сегменти шини I2C мають навіть дюжину пристроїв. Зазвичай для систем є кілька таких сегментів. Один може бути призначений для використання з високошвидкісними пристроями для керування живленням із низькою затримкою. Інший може використовуватися для керування кількома пристроями, де затримка та пропускну здатність не є важливими проблемами; ще один сегмент може використовуватися лише для читання чіпів EEPROM, що описують додаткові карти (наприклад, стандарт SPD, який використовується з накопичувачами DRAM).

У системах керування безпілотного літального апарату, I2C використовується задля взаємодії з EEPROM, блоками температури, вологості та атмосферного тиску.

USART/UART (Universal synchronous/asynchronous receiver-transmitter – універсальний синхронний/асинхронний приймач-передавач) – це комп'ютерний апаратний пристрій для асинхронного (або синхронного, у деяких випадках) послідовного зв'язку, у якому можна налаштувати формат даних і швидкість передачі. Він надсилає біти даних один за одним, від найменш значущого до найбільш значущого, обмежені початковими та стоповими бітами, щоб точний таймінг оброблявся каналом зв'язку. Рівні електричних сигналів обробляються зовнішньою по відношенню до UART схемою драйвера. Два поширені рівня сигналу: RS-232, 12-вольтова система, і RS-485, 5-вольтова система. Це був один із найперших комп'ютерних комунікаційних пристроїв, який використовувався для приєднання телетайпів до консолі оператора. Це також була рання апаратна система для Інтернету.

UART зазвичай є окремою (або частиною) інтегральної схеми (IC), яка використовується для послідовного зв'язку через послідовний порт комп'ютера або периферійного пристрою. Блок-схема UART зображена на рис. 2.7. Один або кілька

периферійних пристроїв UART зазвичай інтегровані в чіпи мікроконтролерів. Спеціалізовані UART використовуються для автомобілів, смарт-карт і SIM-карт.

Споріднений пристрій, універсальний синхронний і асинхронний приймач-передавач (USART), також підтримує синхронну роботу.

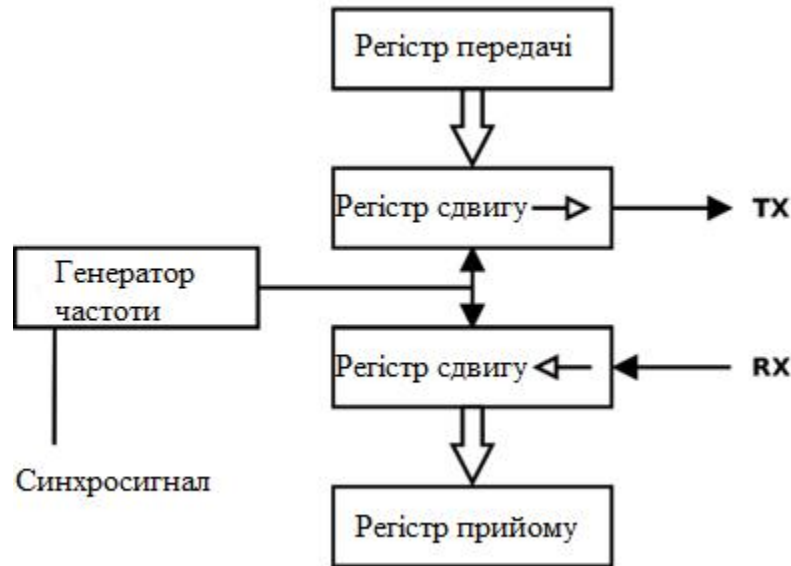


Рис. 2.7. Блок-діаграма UART

Передача та прийом послідовних даних. Універсальний асинхронний приймач-передавач (UART) приймає байти даних і передає окремі біти послідовно [26]. У кінцевому приймачі другий UART повторно збирає біти в повні байти. Кожен UART містить регістр зсуву, який є основним методом перетворення між послідовною та паралельною формами. Послідовна передача цифрової інформації (біт) через один дріт або інше середовище є менш дорогою, ніж паралельна передача через кілька проводів.

Зазвичай UART безпосередньо не генерує та не приймає зовнішні сигнали, що використовуються між різними елементами обладнання. Окремі інтерфейсні пристрої використовуються для перетворення сигналів логічного рівня UART на зовнішні рівні сигналізації та з них, якими можуть бути стандартизовані рівні напруги, рівні струму або інші сигнали.

Комунікація може вестись у різних 3 режимах:

- симплекс (тільки в одному напрямку, без можливості приймального пристрою надсилати інформацію назад на передавальний пристрій)

- повний дуплекс (обидва пристрої надсилають і отримують одночасно)
- напівдуплекс (пристрої по черзі передають і приймають)

Формування даних. Щоб UART працював, наступні параметри повинні бути однаковими як на стороні передачі, так і на стороні приймання:

- Швидкість передачі даних
- Біт парності
- Розмір бітів даних
- Розмір стопових бітів
- Управління потоком

У найпоширеніших налаштуваннях 8 біт даних, без паритету та 1 стоп-біт (він же 8N1) ефективність протоколу становить 80%. Ethernet для порівняння становить до 97%.

Фрейм UART складається з 5 елементів (рис.2.8.):

- Неактивний (логічний 1)
- Стартовий біт (логічний 0)
- Біти даних
- Біт парності
- Стоп (логічний 1)

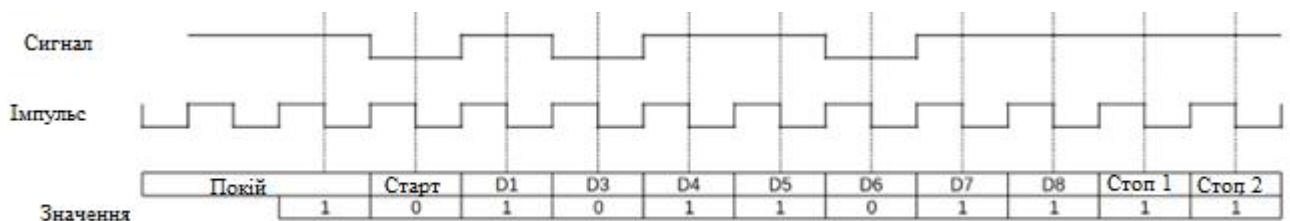


Рис. 2.8. Типовий фрейм UART

Кожен символ оформляється у вигляді логічного молодшого початкового біта, бітів даних, опціонально, біта парності та одного або кількох стоп-бітів. У більшості програм молодший біт даних передається першим (але є винятки).

Початковий біт сигналізує одержувачу, що приходить новий символ.

Наступні 5-9 біт, залежно від використовуваного кодового набору, представляють символ.

Якщо використовується біт парності, він буде розміщений після всіх бітів даних, він описує непарність чи парність числа.

Наступні один або два біти завжди знаходяться в стані позначки (логічний високий рівень, тобто «1») і називаються стоп-бітами. Вони сигналізують одержувачу, що відправкасимволувиконана. Оскільки початковий біт має логічний низький рівень (0), а стоп-біт має високий логічний рівень (1), завжди є принаймні дві гарантовані зміни сигналу між символами.

Якщо лінія утримується в стані логічного низького рівня довше, ніж один символ, це умова розриву, яку може виявити UART.

UART зазвичай містить такі компоненти:

- тактовий генератор, як правило, кратний бітрейту, щоб забезпечити вибірку в середині періоду біта
- вхідні та вихідні регістри зсуву
- керування прийомом/передачею
- логіка керування читанням/записом
- вимірювання автоматичної передачі даних (опціонально)
- буфери передачі/отримання (опціонально)
- системний буфер шини даних (опціонально)
- буферна пам'ять першим входить, першим виходить (FIFO) (опціонально)
- сигнали, необхідні сторонньому контролеру DMA (опціонально)
- інтегрований контролер керування шиною DMA (опціонально)

Приймач. Усі операції апаратного забезпечення UART контролюються внутрішнім тактовим сигналом, який працює на кратній швидкості передачі даних, як правило, у 8 або 16 більшим ніж бітрейт. Приймач перевіряє стан вхідного сигналу на кожному тактовому імпульсі, шукаючи початок стартового біта. Якщо видимий початковий біт триває принаймні половину часу біта, він дійсний і сигналізує про початок нового символу. Якщо ні, це вважається помилковим імпульсом і він ігнорується. Після очікування додаткового бітового часу стан лінії

знову дискретизується, а отриманий рівень синхронізується в регістрі зсуву. Після того, як мине необхідна кількість бітових періодів для довжини символу (зазвичай від 5 до 8 біт), вміст регістра зсуву стає доступним (паралельно) для приймаючої системи. UART встановить позначку, що вказує на наявність нових даних, а також може генерувати переривання процесора, щоб головний процесор передав отримані дані.

UART для зв'язку не мають спільної системи синхронізації, окрім сигналу зв'язку. Як правило, UART повторно синхронізують свої внутрішні годинники при кожній зміні лінії даних, яка не вважається помилковим імпульсом. Спрощені UART цього не роблять, натомість вони повторно синхронізуються лише за спадаючим фронтом початкового біта, а потім зчитують центр кожного очікуваного біта даних, і ця система працює, якщо швидкість передачі даних достатньо точна, щоб дозволити надійну дискретизацію стоп-бітів [27].

Стандартною функцією UART є збереження останнього символу під час отримання наступного. Ця “подвійна буферизація” дає комп'ютеру-одержувачу весь час передачі символів для обробки отриманого символу. Багато UART мають невелику буферну пам'ять типу “перший увійшов, перший вийшов” (FIFO) між регістром зсуву приймача та інтерфейсом головної системи. Це дає хост-процесору ще більше часу для обробки переривання від UART і запобігає втраті отриманих даних на високих швидкостях.

Передавач. Операція передачі є простішою, оскільки синхронізацію не потрібно визначати за станом лінії, а також вона не прив'язана до будь-яких фіксованих інтервалів синхронізації. Як тільки система відправлення вносить символ у регістр зсуву (після завершення попереднього символу), UART генерує початковий біт, зсуває необхідну кількість бітів даних у рядок, генерує та надсилає біт парності (якщо використовується), і надсилає стопові біти. Оскільки повнодуплексна робота вимагає одночасного надсилання та отримання символів, UART використовують два різних регістри зсуву для переданих і прийнятих символів. Високопродуктивні UART можуть містити буфер передачі FIFO (першим прийшов, першим вийшов), щоб дозволити контролеру ЦП або DMA вносити кілька

символів у пакеті в FIFO замість того, щоб вносити по одному символу в регістр зсуву. Оскільки передача одного або кількох символів може зайняти тривалий час відносно швидкості процесора, UART підтримує прапор, який показує статус зайнятості, щоб хост-система знала, чи є принаймні один символ у буфері передачі або регістрі зсуву, готовність до наступного символу також може сигналізуватись перериванням.

Використання. Для належної роботи UART для передачі та отримання мають бути однакові бітова швидкість, довжина символів, парність і стоп-біти. Приймаючий UART може виявити деякі невідповідні налаштування та встановити біт прапора “помилка фрейму” для головної системи, у виняткових випадках приймаючий UART вироблятиме непостійний потік спотворених символів і передаватиме їх до головної системи.

Типові послідовні порти, що використовуються з персональними комп’ютерами, підключеними до модемів, використовують вісім біт даних, без паритету та один стоп-біт, для цієї конфігурації кількість символів ASCII за секунду дорівнює бітрейту, поділеному на 10.

Для керування БПЛА, UART може використовуватись для дуже багатьох цілей:

1. Основне застосування – взаємодія мікроконтролера з ПК. Один з найзручніших способів (хоча й один з найповільніших) передачі даних між платою та комп’ютером. Зазвичай, служить для передачі невеликих даних, таких як координати у реальному часі, висота польоту, атмосферні параметри, показники або багато інших датчиків. Недолік полягає у тому, що при передачі комплексної структури даних, треба розробити протоколи серіалізації.

2. Взаємодія мікроконтролера з модулями GPS. Майже всі модулі супутникової навігації (GPS/Beidou/Galileo) модулі, що представлені на ринку, працюють саме через UART–сумісний інтерфейс.

3. Bluetooth і Wi-Fi модулі – більшість модулів цього типу працюють також через UART–сумісний інтерфейс.

2.2 Огляд параметрів мікроконтролерів для зв'язку з безпілотними літальними апаратами

На сьогоднішній день, на ринку є досить широкий вибір різноманітних мікроконтролерів та модулів. Найбільш поширенішими варіантами для систем керування та моніторингу БПЛА є мікроконтролери, побудовані на архітектурах ARMі AVR. ARM (акронім від Advanced RISC Machines, оригінальна назва Acorn RISC Machine) – сімейство процесорів 32 або 64 бітної розрядності. ARM визначає лише архітектуру та набір асемблерних команд, та самостійно не випускає процесори та мікроконтролери. Сторонні виробники, використовують архітектуру ARM у своїх SoC (System on Chip), наприклад сімейство 32-бітних контролерів STM32 від STMicroelectronics, різні системи на кристалі для low-powered бездротової комунікації від Nordic Semiconductors, такі як сімейство nRFxx або деякі системи на Texas Instruments.

Архітектуру AVR, в основному використовують мікроконтролери Arduino, які відповідно використовують SoC Atmega.

Вибір мікроконтролера повинен ґрунтуватися на моделі SoC, на якій базується мікроконтролер, енергоефективності та споживання електроенергії, кількості роз'ємів та портів на платі, фізичних розмірів, екологічності (опціонально), інтерфейсів підключення до інших пристроїв, наявності програматора і т.п. В свою чергу, вибір SoC повинен ґрунтуватися на таких факторах як:

1. Наявність та зручність програмного забезпечення під конкретний чіп. Програмне забезпечення включає в себе: можливі бібліотеки для доступу до апаратної частини, CAD програми з зручним інтерфейсом для, наприклад візуального програмування чіпу, різноманітні компілятори, бутлоадери та драйвери.

2. Наявність необхідних інтерфейсів та компонентів, і їх кількість. Потрібно враховувати наявність та кількість таймерів, інтерфейсів I2C, SPI та портів UART, контролерів DMA і т.п.

3. Архітектура

4. Параметри чіпу, такі як: температурний діапазон, частотні параметри осцилятора, параметри внутрішніх шин тактування.
5. Наявність адекватної, детальної та актуальної документації.
6. Підтримка від виробника

Так як основною задачею слугує обробка багатьох сигналів одночасно, потрібно обирати мікроконтролер, з оглядом на кількість вхідних роз'ємів, наявність багатьох SPIнтерфейсів та можливість керувати як мінімум 2 серводвигунами (тобто, видавати ШІМ сигнал з досить маленьким значенням робочого циклу).

Також, потрібно обробляти сигнали досить швидко, а для написання логіки обробки сигналів буде дуже зручно мати добре написану документацію та добре розроблені програмні бібліотеки для доступу до апаратної частини. З цією метою, було обрано мікроконтролер STM32F411RE. Даний мікроконтролер має дуже зручні інструменти розробки, бо дозволяє програмувати як використовуючи низькорівневі бібліотеки по типу CMSIS (Common Microcontroller Software Interface Standard), що дає зручний доступ напряду до регістрів без використання операційної системи реального часу, або HAL (HardwareAccessLayer) – що надає більш високорівневий доступ до компонентів системи. Також, розробку можна вести у таких середовищах як CubeIDE чи CubeMX. Також, даний мікроконтролер має 5 інтерфейсів SPI, що дозволить досить легко підключати високошвидкісні модулі для радіозв'язку. Також, він має 6 16-бітних таймерів, 3 інтерфейси I2C, 512 кілобайт запису прошивки, 128 кілобайт ОЗП. Даний мікроконтролер побудовано на ядрі ArmCortex-M4.

Висновок

У даному розділі, було розглянуто способи та принципи побудови бортового та наземного обладнання для керування БПЛА. Було розглянуто популярні та найбільш використовувані протоколи і стандарти комунікація між модулями та елементами системи. Було зроблено огляд інтерфейсів, що використовуються у проектованій системі, такі як I2C, SPI та UART, що використовуються у проекті для підключення зовнішніх компасів, сховищ

даний і т.п., а також підключення до ПК за допомогою UART. Також, було проведено аналіз мікроконтролерів на ринку та обрано саме той мікроконтролер, який підходить до вирішення заданої задачі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ

3.1 Математична модель обраної антенної системи

Для дослідження було вибрано антенну систему (АС), яка являє собою чотирьохелементну антенну решітку (АР), кожен елемент якої складається з двох взаємно перпендикулярних симетричних вібраторів [28] (рис. 3.1). Повна структурна схема АС зображена на рис. 3.2. На рис. 3.2 присутні такі позначення: комутатори K_1 - K_4 , генератор тестових напруг ГТН, блок керування комутаторами БКК, блоки підсилення і частотного перетворення БПЧП₁- БПЧП₄, амплітудно-фазові коректори АФК, блоку керованих генераторів БКГ, детектори Д, квадратори Q, суматори Σ , випрямлячі В, віднімачі Δ , пристрій індикації та реєстрації сигналів ПРС.

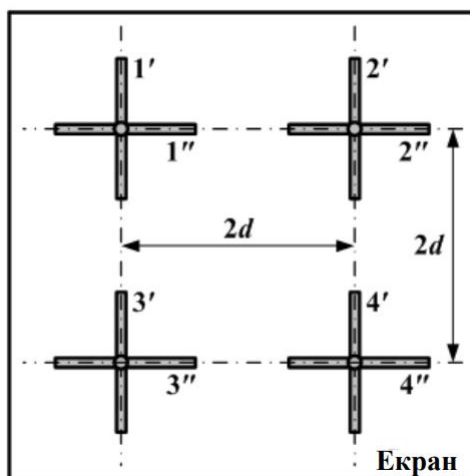


Рис 3.1. Апертура чотирьохелементної АР 2x2

Діаграма спрямованості (ДС) формується розміщенням антенної решітки над прямокутним екраном. Характеристики спрямованості елементів АР при використанні пасивних вібраторів мають вигляд:

для вертикального вібратора:

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sin \theta},$$

для горизонтального вібратора:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos(kl \sin \theta \sin \varphi) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}},$$

де l – довжина плеча вібратора.

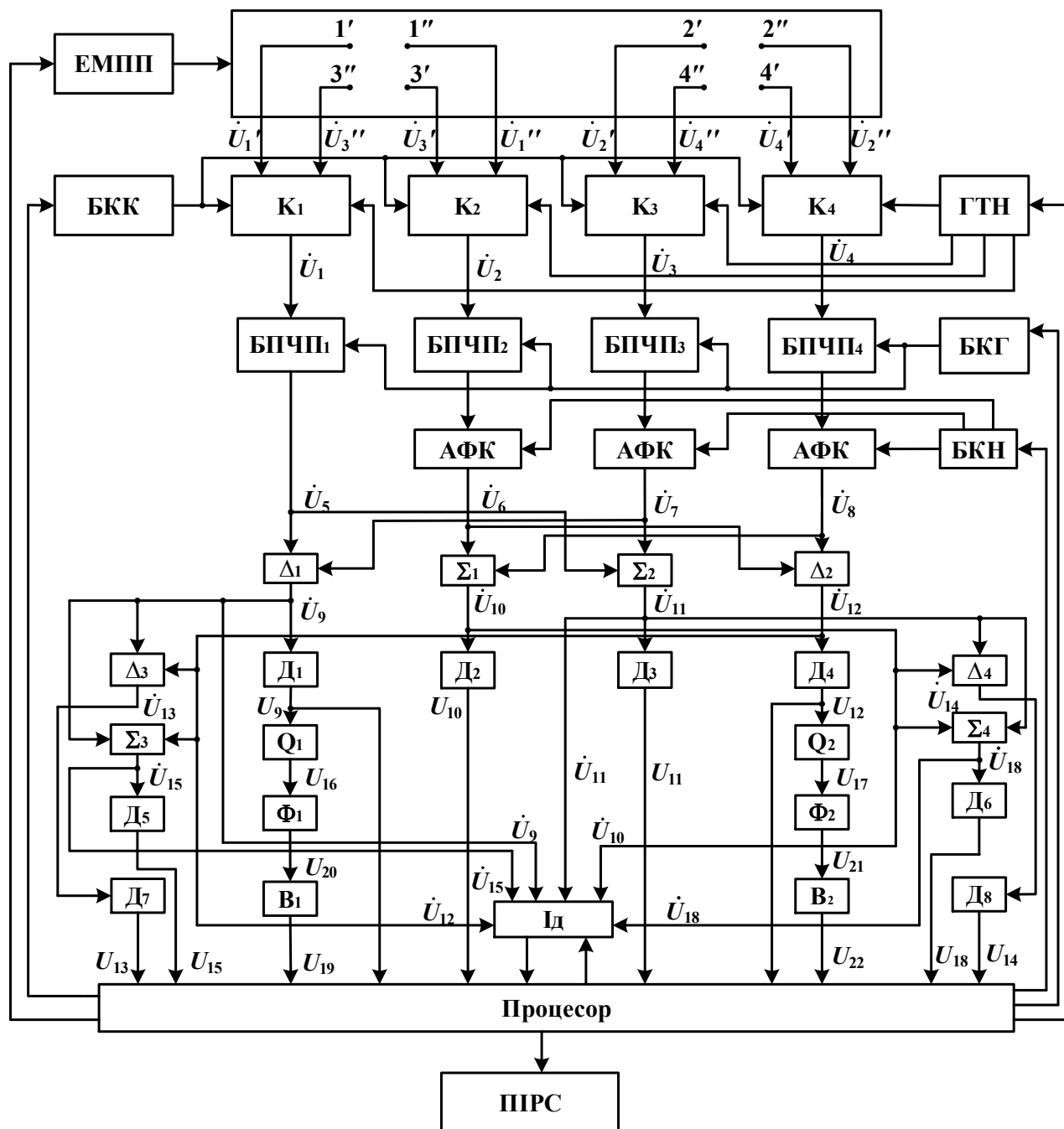


Рис. 3.2. Структурна схема антенної системи з АР 2х2.

Наведені напруги на вихідних затискачах фідерних трактів:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{p\phi} &= \dot{U}'_p = i2K_{\phi}E_{\theta}l_{\text{д}}F(\theta)e^{i\alpha}\sin(\gamma\cos\varphi); \\ \dot{U}_{q\phi} &= \dot{U}'_q = i2K_{\phi}E_{\theta}l_{\text{д}}F(\theta)e^{-i\alpha}\sin(\gamma\cos\varphi); \\ \dot{U}_{p\phi} &= \dot{U}''_p = i2K_{\phi}E_{\varphi}l_{\text{д}}F(\theta,\varphi)e^{i\alpha}\sin(\gamma\cos\varphi); \\ \dot{U}_{q\phi} &= \dot{U}''_q = i2K_{\phi}E_{\varphi}l_{\text{д}}F(\theta,\varphi)e^{-i\alpha}\sin(\gamma\cos\varphi), \end{aligned} \right\}$$

де $p=1,3$, $q=2,4$; $\alpha_z = kd_z \cos\theta$, $\alpha_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi$, $\gamma = kd_x \sin\theta$ – фазові зсуви в залежності від осі розташування вібраторів.

На першому етапі моніторингу (визначення азимутального кута джерела) комутатори приєднують затискачі вібраторів $1'$, $1''$ і $2'$, $2''$ до входів чотирьох каналів БПЧП. Напруги на виходах каналів набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_5 &= \dot{U}_a^{\theta} e^{i\alpha_y^a} \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_6 &= \dot{U}_a^{\varphi} e^{i\alpha_y^a} \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_7 &= \dot{U}_a^{\theta} e^{-i\alpha_y^a} \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_8 &= \dot{U}_a^{\varphi} e^{-i\alpha_y^a} \sin(\gamma_a \cos\varphi_a). \end{aligned} \right\}$$

Напруги суми і різниці на виходах віднімачів Δ_1 , Δ_2 і суматорів Σ_1 , Σ_2 :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_9 &= i2\dot{U}_a^{\theta} \sin\alpha_y^a \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_{10} &= 2\dot{U}_a^{\varphi} \cos\alpha_y^a \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_{11} &= 2\dot{U}_a^{\theta} \cos\alpha_y^a \sin(\gamma_a \cos\varphi_a); \\ \dot{U}_{12} &= i2\dot{U}_a^{\varphi} \sin\alpha_y^a \sin(\gamma_a \cos\varphi_a). \end{aligned} \right\}$$

Напруги U_9 і U_{12} після детектування використовуються процесором для визначення азимуту джерела випромінювання. Після суміщення нормалі до апертури антени з меридіональною площиною поширення хвилі джерела, напруги U_9 і U_{12} наближаються до нуля і можна спостерігати за джерелом лише за допомогою напруг $\dot{U}_{10}$ і $\dot{U}_{11}$.

На другому етапі моніторингу (визначення меридіональної кутової координати джерела) використовується конфігурація антенної решітки, яка складається з вібраторів $1'$, $2'$, $3'$ і $4'$. Сигнали

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{10} &= 2\dot{U}_a^0 \sin \alpha_y^a \sin \gamma_a e^{-i\alpha_z}; \\ \dot{U}_{11} &= 2\dot{U}_a^0 \sin \alpha_y^a \sin \gamma_a e^{i\alpha_z}. \end{aligned} \right\}$$

надходять до віднімача Δ_4 , на виході якого матимемо:

$$\dot{U}_{14} = \dot{U}_{11} - \dot{U}_{10} = i4\dot{U}_a^0 2 \sin \gamma_a \sin(kd \cos \theta_a).$$

Амплітуда цієї напруги після детектора D_8 використовується процесором як індикатор наведення апертури антени в меридіональній площині на напрям падіння хвилі від джерела випромінювання. Процесор виробляє команди для обертання апертури антени в меридіональній площині електромеханічним пристроєм (ЕМПП) для досягнення нульового значення напруги U_{14}

$$U_{14} = 4U_a^0 \sin \gamma_a \sin(kd \cos \theta_a).$$

Для більш повного розуміння процесу пеленгації за допомогою індикаторних напруг було побудовано графіки на рис. 3.3 -3.6.

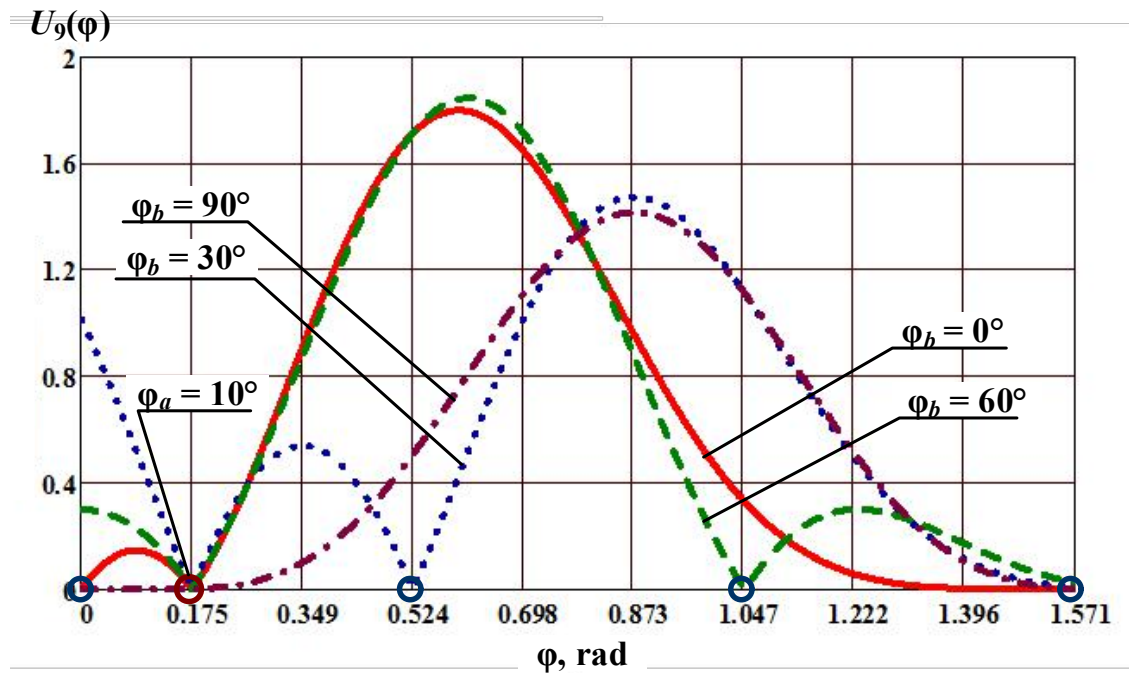


Рис. 3.3. Залежність індикаторної напруги U_9 від азимутального відхилення антени від початкового стану при фіксованому значенні кута $\theta = 90$ град за наявності завади

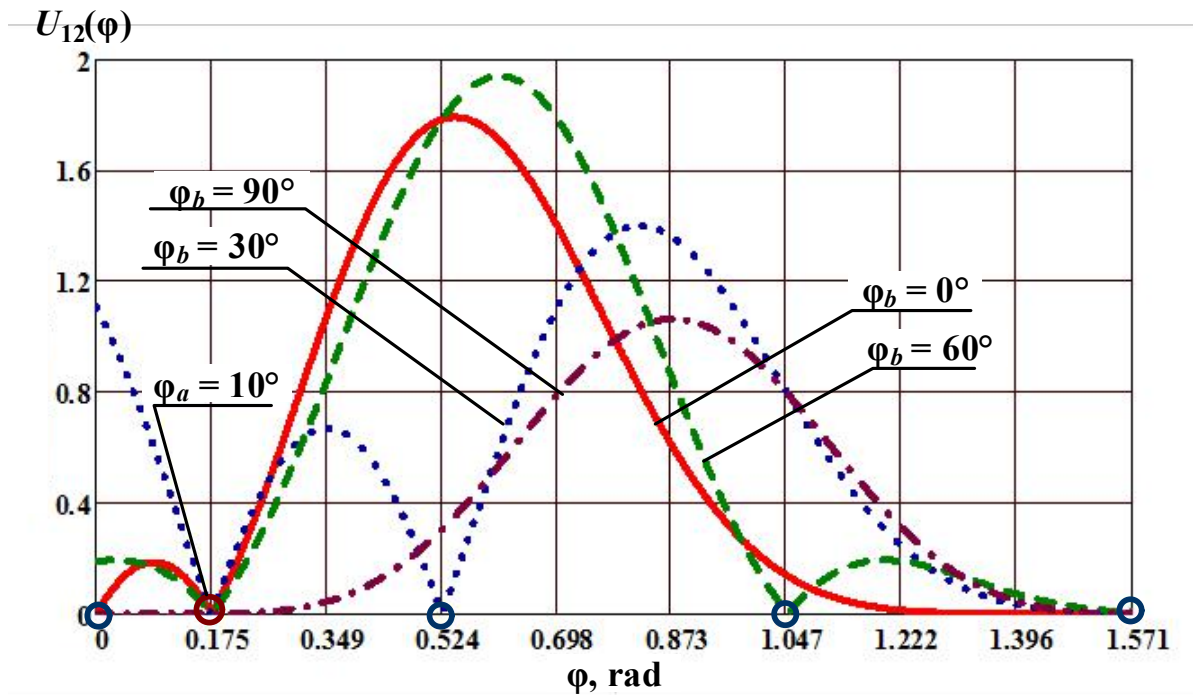


Рис. 3.4. Залежність індикаторної напруги U_{12} від азимутального відхилення антени від початкового стану при фіксованому значенні кута $\theta = 90$ град за наявності завади

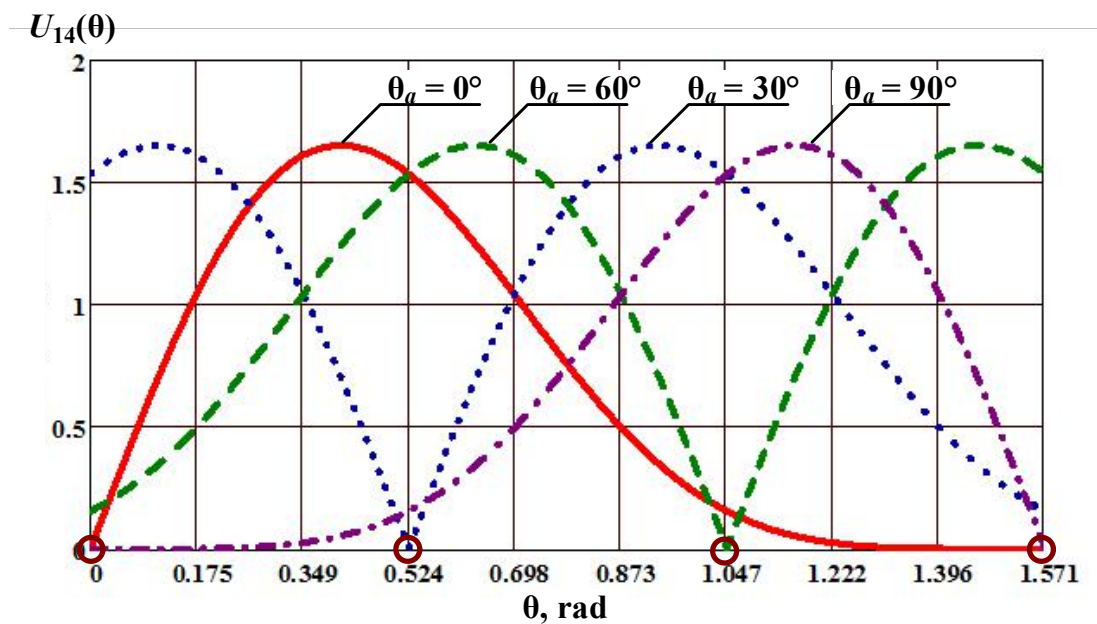


Рис. 3.5. Залежність індикаторної напруги U_{14} від меридіонального відхилення антени від початкового стану при фіксованому значенні кутового рознесення джерела випромінювання сигналу і завади $\chi = \varphi_a - \varphi_b = 10$ град

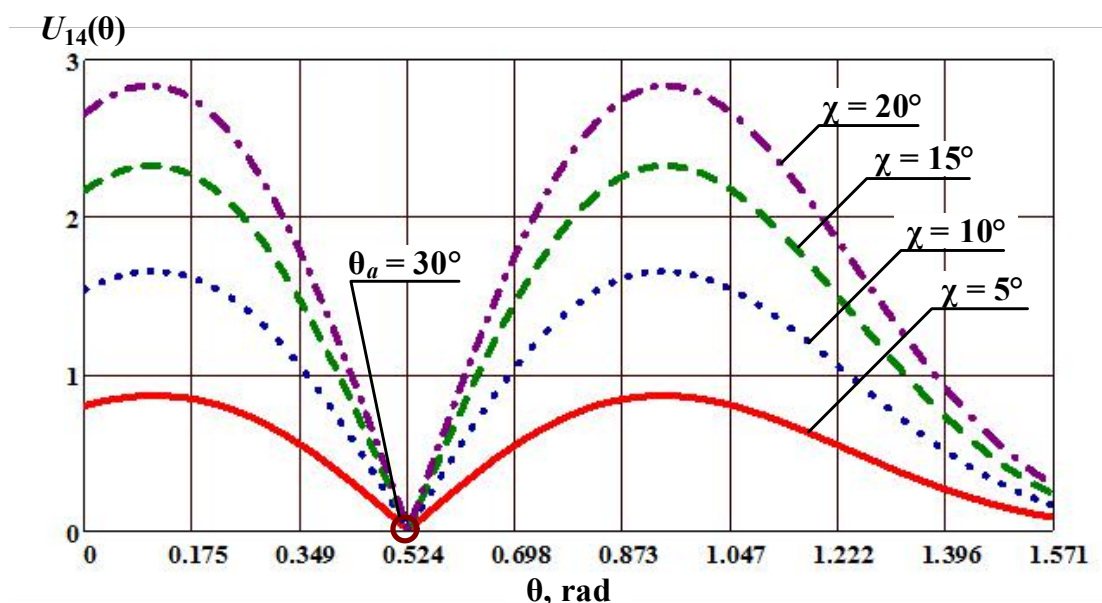


Рис. 3.6. Залежність індикаторної напруги U_{14} від меридіонального відхилення антени від початкового стану при фіксованому значенні меридіонального кута приходу сигналу $\theta_a = 30$ град

З та графіків на рис. 3.3 та 3.4 можна зробити висновок, що індикаторні напруги U_9 і U_{12} дорівнюють нулю при $\varphi_a = \varphi$ або $\varphi_b = \varphi$. Тобто, для знаходження азимутальних пеленгів джерел апертуру антени необхідно обертати в азимутальній площині до досягнення нульового значення індикаторних напруг.

Шляхом обертання апертури АР в меридіональній площині досягаємо значення $U_{\pi} > \dot{U}_{14}$. Тобто, відбувається наведення нормалі до апертури антени на напрям випромінювання хвиль від джерела сигналу.

Після визначення кутових координат джерел випромінювання антенна система повертається в основний режим роботи – режим прийому сигналу.

3.2. Програмна реалізація антенної системи

Програма мікроконтролера починає виконання з ініціалізації периферії.

Перш за все, виконується скидання налаштувань RCC, функцією *RCC_DeInit()*.

Після скидання налаштувань та встановлення до початкових, виконується ініціалізація портів для керування електромеханічним обертальним приладом

(ЕМПП), портів для взаємодії з терміналом (комп'ютером) по USART і кнопки на платі:

```
void configure_timer_pins(void){
    RCC -> AHB1ENR |= RCC_AHB1ENR_GPIOAEN;

    GPIOA -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER5_0;
    GPIOA -> MODER |= GPIO_MODER_MODER5_1;

    GPIOA -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER1_0;
    GPIOA -> MODER |= GPIO_MODER_MODER1_1;

    GPIOA -> AFR[0] |= (1U<<20);
    GPIOA -> AFR[0] |= (1U<<4);

    RCC -> APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM2EN;
}
```

Рис. 3.7. Початкові ініціалізація портів керування ЕМПП

```
void configure_usart_pins(void){
    RCC -> AHB1ENR |= RCC_AHB1ENR_GPIOAEN;

    USART_DeInit(USART2);

    GPIOA -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER3_0;
    GPIOA -> MODER |= GPIO_MODER_MODER3_1;

    GPIOA -> AFR[0] |= (GPIO_AF_USART2 << 12);

    GPIOA -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER2_0;
    GPIOA -> MODER |= GPIO_MODER_MODER2_1;

    GPIOA -> AFR[0] |= (GPIO_AF_USART2 << 8);

    RCC -> APB1ENR |= RCC_APB1ENR_USART2EN;
}
```

Рис. 3.8. Початкова ініціалізація портів USART

Наступним кроком, йде ініціалізація самого USART, налаштування приймача та передавача:

```
void initialize_usart_rx(USART_TypeDef *usart, IRQn_Type irqn){
    uint16_t baud_rate = compute_uart_BD(HSI_VALUE, USART_BaudRate);

    usart -> BRR = baud_rate;
    usart -> CR1 |= (USART_CR1_RE | USART_CR1_UE | USART_CR1_RXNEIE);
    enable_irq(irqn);
}

void initialize_usart_tx(USART_TypeDef *usart, IRQn_Type irqn){
    uint16_t baud_rate = compute_uart_BD(HSI_VALUE, USART_BaudRate);

    usart -> BRR = baud_rate;

    usart -> CR1 |= (USART_CR1_TE | USART_CR1_UE | USART_CR1_TXEIE);

    enable_irq(USART2_IRQn);
}

static uint16_t compute_uart_BD(uint32_t periphClk, uint32_t baudRate){
    return ((periphClk + (baudRate/2U))/baudRate);
}
```

Рис. 3.9. Ініціалізація RX, TX

Для керування ЕМПП, використовується 2-канальний таймер, 1-й канал для обертання ЕМПП у горизонтальній площині, 2-й канал для обертання у вертикальній площині.

```
void initialize_servo(TIM_TypeDef *timer){
    TIM_DeInit(timer);

    timer -> CCMR1 &= ~ TIM_CCMR1_CC1S_0;
    timer -> CCMR1 &= ~ TIM_CCMR1_CC1S_1;

    timer -> CCMR1 &= ~ TIM_CCMR1_CC2S_0;
    timer -> CCMR1 &= ~ TIM_CCMR1_CC2S_1;

    timer -> CCMR1 |= (TIM_CCMR1_OC1M_1 | TIM_CCMR1_OC1M_2);
    timer -> CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_OC1M_0;

    timer -> CCMR1 |= (TIM_CCMR1_OC2M_1 | TIM_CCMR1_OC2M_2);
    timer -> CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_OC2M_0;

    timer -> CCER |= TIM_CCER_CC1E;
    timer -> CCER |= TIM_CCER_CC2E;

    timer -> PSC = 16 - 1;
    timer -> CNT = 0;

    timer -> CCR1 = 0;
    timer -> CCR2 = 0;
    timer -> ARR = 20000 - 1;

    timer -> CR1 = TIM_CR1_CEN;
}
```

Fedir Katushonok, 2 days ago • added rotation i both d

Рис. 3.10. Ініціалізація таймеру та каналів

У ЕМПП, для обертання АР у 2 площинах використовуються 2 сервоприводи, що керуються довжиною робочого циклу ШІМ сигналу з періодом 20 мс. Тому, у регістр PSC (Prescaler) вноситься значення 16 – 1 (16 – множник послаблення частоти, яка в даному випадку становить 16 МГц, використовується значення PSC – 1 для виключення можливості вписати 0), що робить частоту тактування на таймері:

$$f_{TIM_CK} = \frac{f_{PSC}}{PSC + 1} = \frac{16000000}{16} = 10^6 \text{ Гц}$$

Тобто, таймер має мінімальну одиницю відліку у 1 мкс. Таке значення було взяте задля задання підвищеної точності сигналу керування, що дає можливість керувати з точністю до 0.01 градуса. Для генерування імпульсів довжиною періодом 20 мс, у регістр ARR встановлено значення 20000 (20000 мкс = 20 мс).

Для обертання АР у заданій площині на заданий кут, використовується така функція:

```

void rotate_to_angle(TIM_TypeDef *timer, int channel, float degrees){
    int usecs = (int)(degrees / DEGREES_IN_SEC);
    usecs += MIN_ANGLE_PULSE;

    if(usecs > MAX_ANGLE_PULSE){
        usecs = MAX_ANGLE_PULSE;
    }

    if(channel == 1){
        timer -> CCR1 = usecs;
    }
    else if(channel == 2){
        timer -> CCR2 = usecs;
    }
}

```

Fedir Katushonok, 3 days ago • Added servo code ...

Рис. 3.11. Функція обертання ЕМПП

Тут, параметр `channel` задає канал (1 – вертикальний, 2 – горизонтальний), `degrees` – градус обертання. Використані при розробці сервоприводи серії SG90 вимагають мінімальної довжини робочого циклу у 500 мкс, і максимальної довжини у 2.5 мс. Задля цього, введено параметри `MIN_ANGLE_PULSE` і `MAX_ANGLE_PULSE`. Значення у градусах ділиться на множник співвідношення (градуси/мікросекунди), та отримане значення у мікросекундах додається до мінімальної довжини робочого циклу, та завантажується у регістр каналу 1 або 2, для використання у наступному такті.

Після ініціалізації периферії для ЕМПП, проводиться ініціалізація периферії для взаємодії із компасом, що підключається по шині I2C, і служить для прив'язки кута обертання ЕМПП у азимутальній площині до реального азимуту місцевості.

Спочатку, проходить налаштування портів на роботу у режимі I2C

```

void I2C1_initialize_pins(void){
    RCC -> AHB1ENR |= RCC_AHB1ENR_GPIOBEN;

    GPIOB -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER8_0;
    GPIOB -> MODER |= GPIO_MODER_MODER8_1;

    GPIOB -> MODER &=~GPIO_MODER_MODER9_0;
    GPIOB -> MODER |= GPIO_MODER_MODER9_1;

    GPIOB -> OTYPER |= GPIO_OTYPER_OT_8;
    GPIOB -> OTYPER |= GPIO_OTYPER_OT_9;

    GPIOB -> PUPDR |= GPIO_PUPDR_PUPDR8_0;
    GPIOB -> PUPDR &=~GPIO_PUPDR_PUPDR8_1;

    GPIOB -> PUPDR |= GPIO_PUPDR_PUPDR9_0;
    GPIOB -> PUPDR &=~GPIO_PUPDR_PUPDR9_1;

    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<0);
    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<1);
    GPIOB -> AFRR[1] |= (1U<<2);
    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<3);

    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<4);
    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<5);
    GPIOB -> AFRR[1] |= (1U<<6);
    GPIOB -> AFRR[1] &=~(1U<<7);
}

```

You, 2 months ago • Added I2C basic project

Рис. 3.12. Налаштування портів мікроконтролера на роботу з компасом по I2C

Далі, включається тактування сигналу внутрішньої шини на інтерфейс I2C, записуючи у регістр APB1ENR_I2C1EN значення 1, а також проводиться скидання налаштувань та встановлення параметрів контролю роботи інтерфейсу.

```
void I2C1_Set_bits(void){
    I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_SWRST;

    I2C1 -> CR1 &=~I2C_CR1_SWRST;

    I2C1 -> CR2 |= I2C_CR2_FREQ_4;

    I2C1 -> CCR = I2C1_CCR;

    I2C1 -> TRISE = I2C1_TRISE;

    I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_PE;

    I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_ACK;
}
```

Рис. 3.13. Встановлення параметрів контролю

Для початку взаємодії, до компасу посилається його адреса та режим роботи (у даному випадку, запис), а також необхідність перевірки інтерфейсу на зайнятість.

```
void I2C1_SendAddrAndMode(char saddr, int check_busy){
    volatile int tmp;

    if(check_busy){
        while(I2C1 -> SR2 & I2C_SR2_BUSY){}
    }

    I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_START;

    while(!(I2C1 -> SR1 & I2C_SR1_SB)){

    }

    I2C1 -> DR = saddr;

    while(!(I2C1 -> SR1 & I2C_SR1_ADDR)){

    }

    tmp = I2C1 -> SR2;
}
```

Рис. 3.14. Метод початкової взаємодії по I2C

Потім, відсилається сама команда на отримання даних

```
void I2C1_SendCommand(char command){
    while(!(I2C1 -> SR1 & I2C_SR1_TXE)){

    }

    I2C1 -> DR = command;
}
```

Рис. 3.15. Відправка команди на ведений пристрій

І відбувається зчитування даних

```

void I2C1_ReadChunks(int n, char* data){
    I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_ACK;

    while(n > 0){
        if(n == 1){
            I2C1 -> CR1 &=~I2C_CR1_ACK;
            I2C1 -> CR1 |= I2C_CR1_STOP;
        }

        while(!(I2C1 -> SR1 & I2C_SR1_RXNE)){

        }

        *data++ = I2C1 -> DR;

        n--;
    }
}

```

You, last month • Added HTU21 support

Рис. 3.16. Зчитування даних з інтерфейсу I2C

Таке ж саме налаштування, тільки для інтерфейсу I2C2 відбувається і для взаємодії мікроконтролера з EEPROM (блоком постійної пам'яті). Блок постійної пам'яті слугує для збереження налаштувань калібрації та взаємодії з терміналом.

Основний мікроконтролер може працювати у 3 різних режимах, що обираються терміналом (програмою на ПК).

Режим 1 – “Калібрація” - служить для калібрування та синхронізації пристрою обертання, компасу, та радару у терміналі. Даний режим можна ввімкнути, пославши команду 737461727463616c6962 (*startcalib*) і отримавши 63616c69627374617274 (*calibstart*) у відповідь.

Потім, за допомогою кнопок керування на мікроконтролері встановлюється максимальне азимутальне та меридіональне положення, а на терміналі обирається відповідний кут, що відповідає поточному положенню для азимутального та меридіонального кута в просторі. Після цього, така ж сама процедура проводиться для мінімального азимутального і меридіонального положення обертального пристрою, та на терміналі встановлюються відповідні кути. Вимкнути даний режим можна пославши команду 73746f7063616c696278 (*stopcalibx*) і отримавши 63616c696273746f7078 (*calibstopx*) у відповідь.

Режим 2 – “Слідування” - являється основним режимом, і призначений для роботи АР у режимі слідування за ціллю. У даному режимі, мікроконтролер зчитує параметри вхідних сигналів від АР, проводить математичні перетворення та автоматично посилає сигнали на обертальний механізм для зміни азимутального та меридіонального куту.

Режим 3 – “Цілевказання” – допоміжний режим, за допомогою якого можна вказати азимутальний та меридіональний сектор сканування, або просто напрямок, якщо ширина сектора буде рівна 0.

Термінал ПК – застосунок з графічний інтерфейсом, що служить для основної взаємодії з апаратною частиною. Основна його задача – налаштування та моніторинг роботи мікроконтролеру. Даний застосунок доступний для всіх найпопулярніших операційних систем, таких як:

- Windows
- Linux,
- MacOS (MacOS X).

Термінал на ПК має такий вигляд:

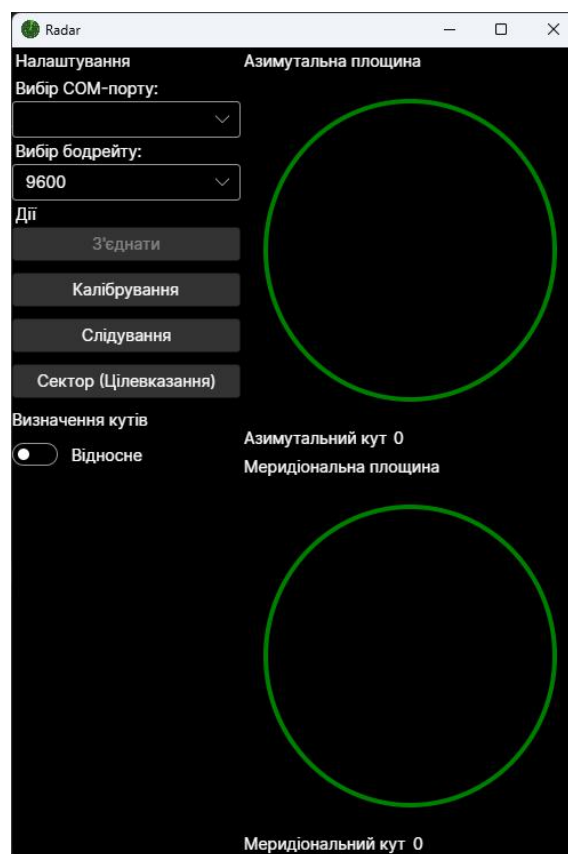


Рис. 3.17. Вигляд терміналу

Зліва розташована панель налаштування та керування. Вона служить для підключення терміналу до апаратури, налаштування та вибору режиму.

Вибір COM-порту – дозволяє обрати COM порт, до якого підключена апаратура.

Вибір бодрейту – вибір одного з заданих значень бодрейту, яку підтримує мікроконтролер.

Кнопка З'єднати слугує для з'єднання терміналу з апаратурою.

Кнопки Калібрування, Слідування та Сектор (Цілевказання) – кнопки вибору відповідних режимів.

Перемикач “Визначення кутів” дозволяє переходити від кутів компасу до відносних кутів і навпаки.

Зелені кола – радіальні координатні сітки для азимутальної та меридіональної площини.

Зелена лінія, що з'єднує центр кола і точку на колі, показує напрямок до цілі, або у режимах Калібрування та Сектор слугує для вказання радіальних кутів.

Для старту роботи потрібно спочатку обрати відповідний СОМ-порт (до цього, всі інші кнопки будуть неактивні) (рис. 3.18.) і відповідний бодрейт (рис. 3.19.)

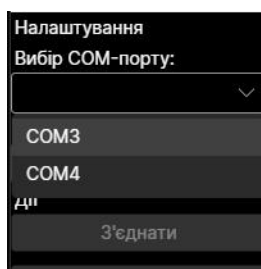


Рис. 3.18. Вибір СОМ-порту

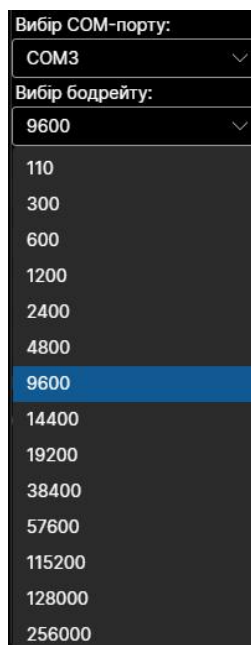


Рис. 3.19. Вибір бодрейту

Після цього, стає активною кнопка інтерфейсу “З’єднати”, що встановлює з’єднання з мікроконтролером відкривши відповідний COM-порт, передавши спеціальний сигнал 68616e647368616b6578 (handshake) та отримавши у відповідь 68616e647368616b6572 (handshaker).

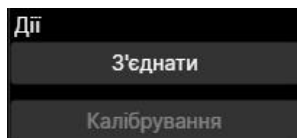


Рис. 3.20 Активна кнопка з’єднати

Після з’єднання всі інші кнопки режимів стають також активними

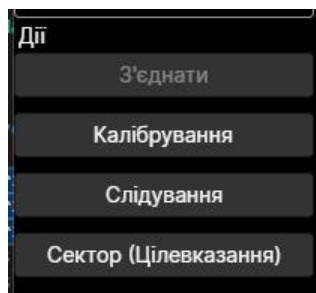


Рис. 3.21. Активні кнопки вибору режиму

До початку проведення калібрування важливо встановити тип координат – відносних, чи просторових (по компасу).

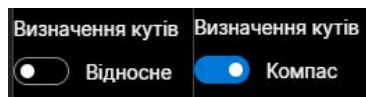


Рис. 3.22 Вибір типів кутових координат

При виборі режиму калібрування, треба перевести обертальний механізм у максимальне меридіональне та азимутальне положення за допомогою механічних кнопок на корпусі, після чого обрати кут, якому відповідає нинішнє положення.

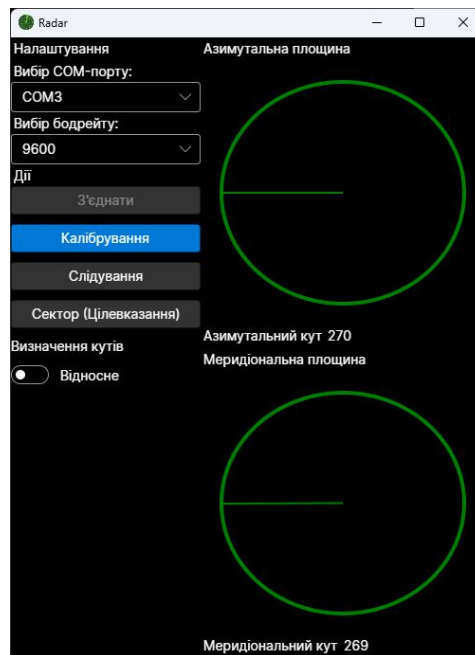


Рис. 3.23 Вибір кута положення

Після вибору максимального і мінімального положень – значення зберігаються на екрані:

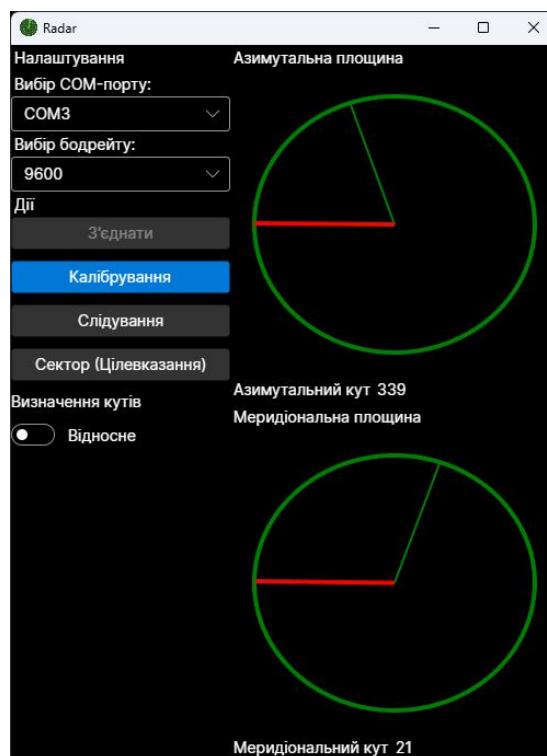


Рис. 3.24 Вибір максимальних кутів

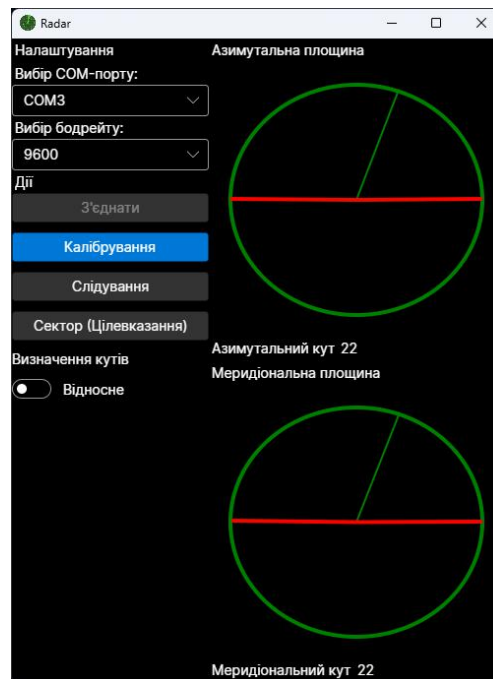


Рис. 3.25 Завершення калібрації

В режимі слідування, автоматика мікроконтролера сама буде робити необхідні дії, щоб забезпечити слідування за ціллю, а на терміналі будуть відображені відповідні положення по азимуту та меридіональному куту.

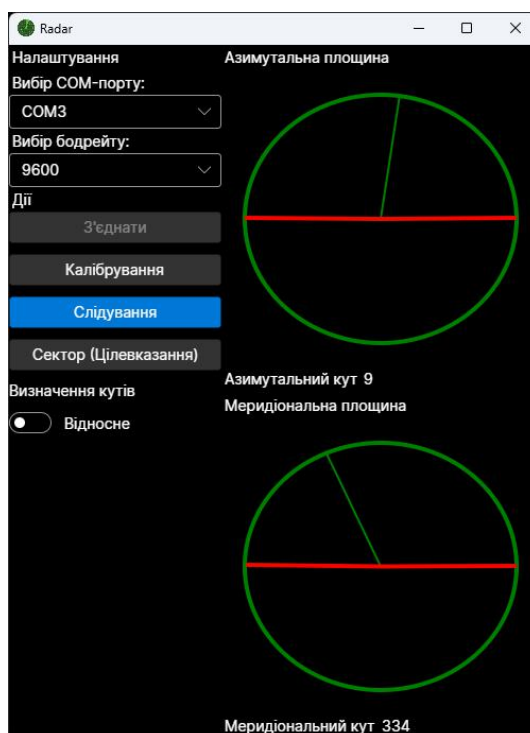


Рис. 3.26 Режим слідування

У режимі Сектор, на радіальній сітці обирається сектор роботи АР

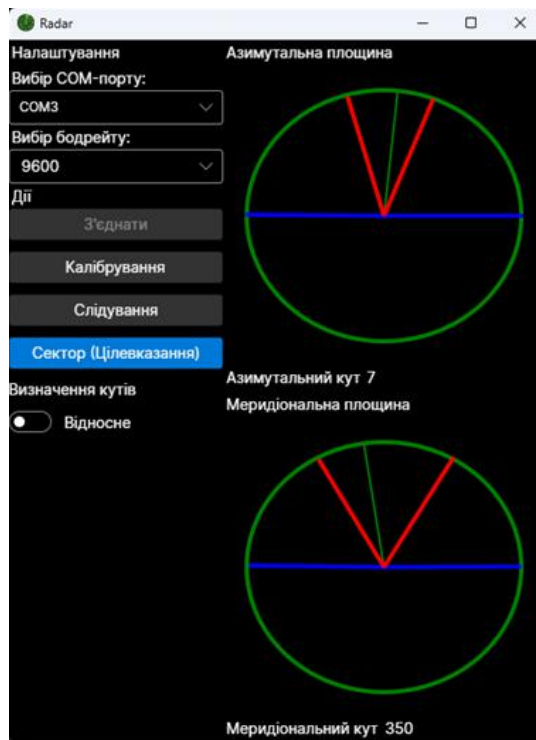


Рис. 3.27 Режим роботи Сектор

Висновок

У даному розділі, було розглянуто теоретичну частину проекрованої антенної решітки а також, проведено деяку частину програмної частини проекту як для мікроконтролеру, так я для ПК терміналу. Було розглянуто режими роботи, та наведено приклади роботи кожного режиму.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Даний розділ містить в собі інформацію щодо охорони праці працівників, що працюють у цілодобовому режимі і забезпечують постійне спостереження за станом системи пожежної безпеки та сигналізації на об'єкті радіомоніторингу.

Повсюдне використання автоматизованих систем моніторингу та керування, створює проблеми оздоровлення та підвищує ризик розвинення багатьох захворювань як фізичного так і ментального характеру. Це спричинено такими факторами: монотонність, наявність електромагнітних випромінювань, високий рівень шуму, присутність дуже великої кількості електронного обладнання що створює небезпеку ураження електричним струмом, обмеження рухової активності, активна зорова робота.

Сукупний вплив цих всіх факторів може спричинити багато проблем працівникам, знизити біоенергетичний потенціал та імунну систему.

Для забезпечення належних умов для персоналу, що обслуговує цю систему, передбачено цілу ланку різноманітних засобів та методів щодо зменшення шкідливого впливу.

4.1 Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів у робочій Зоні

Відповідно з ГОСТ 12.0.003-74, при монтажі, введенні в експлуатацію і ремонті пожежних систем виникають такі небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

- 1) конструкції, які руйнуються (драбини та інше виробниче оснащення);
Робота на драбині є невід'ємною при прокладання проводів, встановлення та обслуговування сповіщувачів, встановлення та обслуговування відеопідсилювачів. Драбини можуть зруйнуватися, спричинивши падіння та тілесні ушкодження.
- 2) підвищена температура поверхонь оснащення і матеріалів;

Для виконання роботи використовується паяльник, при цьому поверхня, а також флюс, каніфоль і олов'яний паяльний елемент нагріваються до досить високих

температур. При порушенні теплового режиму обладнання також можна виявити більш високу температуру поверхонь матеріалів і обладнання.

3) підвищене значення напруги в електричному ланцюзі до 380 В. У разі порушення ізоляції або доторкання до струмоведучих частин може статися ураження електричним струмом. В результаті корпус обладнання може піддаватися дії напруги 220 В змінного струму.

4) розташування робочого місця на значній висоті щодо поверхні землі (підлоги);

Більшість обладнання встановлюють на висотах від 2 до 2,5 метрів.

5) фізичні і нервово-психічні перевантаження;

Системи видають дуже великі обсяги оперативної інформації в робочий час, тому цей елемент впливає на системних операторів з погано встановленими графіками змін.

Експлуатація побудованих протипожежних систем передбачає мінімальний рівень ризику, пов'язаного з появою небезпечних виробничих факторів. Найбільшу небезпеку ураження електричним струмом продовжує становити торкання до струмопровідних предметів і пошкодженої ізоляції.

4.2 Технічні заходи для зменшення впливу шкідливих факторів

Зазначені небезпечні та шкідливі змінні певним чином впливають на здоров'я працівника. Вплив одного з факторів відразу проявляється в людині і проявляється млявістю, запамороченням, головним болем і загальним нездужанням. Все це знижує продуктивність його праці. Внаслідок постійного перебування людей у такій атмосфері розвиваються хронічні захворювання. На здоров'я людини швидко впливають інші обставини, що може призвести до дискомфорту, пошкодження, втрати свідомості та, в екстремальних ситуаціях, смерті.

4.2.1 Заходи від ураження електричним струмом

Виконання наступних вимог безпеки забезпечує виключення чи максимальне зменшення можливості поразки персоналу електричним струмом, а також впливу на нього інших небезпечних факторів:

- 1) монтаж і експлуатацію систем повинні виконувати лише кваліфіковані фахівці;
- 2) дотримання вимог безпеки при виконанні електромонтажних
- 3) оптимальний робочий графік персоналу, що буде обслуговувати систему;
- 4) надійне заземлення корпусу елементів системи, що живляться від джерела перемінного струму 220 В;
- 5) при монтажі й експлуатації виключати дотик інструментів до струмопровідних небезпечних напруг;
- 6) при виконанні паяльних робіт необхідно керуватися вимогами "Санітарних правил організації процесів пайки дрібних виробів, щомістять свинець № 952".

Відповідно до «Правил устроювання електроустановок» всі електроустановки поділяються на два класи: із напругою до 1000 В та з напругою вище 1000 В. Заходи щодо забезпечення електробезпечності розробляються, у першу чергу, виходячи з того, до якого з цих класів відноситься проектувана електроустановка.

I – струм короткого замикання (для електроустановок до 1000 В

$$I_{кз} = \frac{125}{R_3} = 43.1 \text{ А}, R_3 = 2.9 \text{ Ом}$$

T_{cp} – час спрацювання захисту ($t_{cp} = 0.1 \text{ с}$)

Електроустановка приєднана до внутрішньої магістралі, за допомогою мідних і алюмінієвих провідників типу: ПЕВ, ПЕВД із перетином 4-6мм. Прокладка заземлюючих провідників із смугової сталі, проводимо вкрито по конструкції будинку, із метою більш доступного їх догляду.

Зварювання використовується для з'єднання заземлюючого дроту з елементами обладнання.

4.2.2 Заходи захисту від статички

Під час дотику до будь-якого обладнання всередині будівлі охорони може виникнути розряд статичної електрики. Незважаючи на те, що ці розряди не становлять небезпеки для людей, вони можуть призвести до несправності або виходу з ладу обладнання, а також викликати у користувачів неприємні відчуття. Покриття підлоги складається з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму, який зменшує утворення статичної електрики. Загальне та локальне зволоження повітря, яке здійснюється за допомогою зволожувачів, є типовою стратегією запобігання статичної електрики. Заземлення електропровідних компонентів обладнання усуває заряди статичної електрики. Щоб заземлити неметалічні об'єкти, спочатку необхідно нанести електропровідне покриття (провідну емаль). Цей тип заземлення інтегрований із захисним заземленням електрообладнання.

4.2.3 Забезпечення освітлення робочої зони

Побудова ідеального світлового середовища, або логічна організація природного і штучного освітлення приміщень і робочих місць, займає значне місце в комплексі заходів з охорони праці та поліпшення умов праці. У приміщеннях вдень використовується природне однобічне освітлення, а вночі або при недостатніх нормах освітлення - штучне загальне рівномірне освітлення.

Приміщення для роботи з дисплеями та відеотерміналами можна віднести до розряду III зорової роботи (високої точності). Нормований рівень освітленості для роботи з дисплеями - 300 лк.

Вимоги щодо зменшення різкої яскравості та дзеркальності, що відбиває світло: поєднуючи лампи зі змішаним напрямком прямого та відбитого світла, що досягається за допомогою подвійної перехресної оптики, екрани задовольняються. Щоб зменшити сліпучий ефект як прямого, так і відбитого світла, частина прямого світлового потоку лампи проходить через параболічну дзеркальну сітку. Тоді відбите від лампи випромінювання широким потоком спрямовується вгору.

Завдяки такому светораспределению у верхній півсфері яскравість стелі в будь-якому місці, у тому числі і безпосередньо під світильником, не перевищує 200 кд/м². 200 кд/м² — максимально допустима габаритна яскравість для ламп у зоні

кутів випромінювання більше 50° від вертикалі (кандела на квадратний метр). Для штучного освітлення будівлі СКБ використовуються люмінесцентні лампи білого (ЛБ) та темно-білого (ЛТБ) кольорів потужністю 80 Вт.

ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення, ДБН В.2.5-28 поширюються на проектування освітлення територій, приміщень нових та існуючих, що підлягають реконструкції, будівель і споруд житлового, цивільного, виробничого призначення та цивільного захисту, місць виконання робіт на відкритих просторах, територій промислових та сільськогосподарських підприємств, залізничних колій, площ підприємств, зовнішнього освітлення міст, поселень та сільських населених пунктів, вулиць та доріг, озелених територій (парки, сквери, лісопарки), зон відпочинку на ландшафтнорекреаційних територіях та курортних зон, пляжів, пішохідних переходів, фасадів будівель, прибудинкових територій, дитячих майданчиків, сміттєвих майданчиків, автостоянок та гаражів, автозаправок, торговельних майданчиків, ринків, кладовищ.

4.2.4 Електроживлення і заземлення обладнання

Так як система сигналізації є споживачем 1-ї категорії, вона вимагає 2-х незалежних джерел живлення електроенергією.

Підведення живлення до апаратури пожежної сигналізації та оповіщення: 1) електроживлення приймально-контрольного приладу здійснити від вільної групи контактів існуючих розподільних щитів на об'єкті проводом ВВГ 3х1, 5;

2) резервний введення приймально-контрольного приладу "А16-512" і джерела резервного живлення, від якого живляться сповіщувачі системи пожежної сигналізації, живити від акумуляторної батареї ємністю 18А * год; 3) живлення приладу мовного оповіщення про пожежу здійснити від зовнішнього джерела живлення 24В.

Корпуси електрообладнання можуть бути заземлені, щоб захистити обслуговуючих працівників від будь-яких шкідливих напруг, які можуть виникнути в результаті пошкодження ізоляції. Заземлене електрообладнання необхідно з'єднати металевими корпусами обладнання з нейтраллю електромережі, для чого

необхідно використовувати окрему жилу силових кабелів. При виконанні робіт дотримуватись вказівок СНиП 2.05.06-85 «Електротехнічні пристрої».

4.3 Пожежна безпека

Сучасні радіоелектронні прилади мають дуже високу ступінь щільності розміщення елементів електронних схем. Комутаційні кабелі, дроти та з'єднувачі знаходяться в дуже високій близькості один від одного. Протікання струму по ним, виділяється досить велика кількість теплоти, що нагріває деякі вузли апаратури до 80-1000 °С, що може спричинити коротке замикання із подальшим займанням з можливими утворенням іскор.

Для протидії таким небезпекам, у будівлі передбачені протипожежні перешкоди: перекриття, двері і т.п. Дуже високу значимість мають шляхи евакуації персоналу з будівлі на випадок пожежі. Щоб сповістити персонал про пожежу, у будівлі встановлено спеціальні датчики, що реєструють наявність у повітрі певної кількості диму, або різке підвищення температури (термопарою або інфрачервоною камерою).

Ступінь вогнестійкості будинку визначається класами пожежної небезпеки та межами вогнестійкості будівельних конструкцій. Об'єкт має III ступінь вогнестійкості.

У шляхів евакуації мінімальна ширина дверей повинна бути не менше 0.9 м. Висота проходу – не менше 2 м. Двері повинні відкриватись у напрямку виходу з будівлі.

Вогнегасники розрізняють за способом спрацьовування:

- автоматичні — стаціонарно монтуються в місцях можливого виникнення вогню.
- ручні (приводяться в дію людиною) — розташовуються на спеціально оформлених місцях.
- комбінованої дії — мають переваги обох вищеописаних типів.

Залежно від закачаної вогнегасної речовини, вогнегасники поділяються на п'ять видів:

- вуглекислотні;
- повітряно-пінні;
- порошкові;
- водні;
- аерозольні.

4.4 Інструкція з техніки безпеки, пожежної та вибухової безпеки

Інструкція написана згідно з «Пожежна безпека технологічних процесів», «Пожежна техніка для захисту об'єктів» та «Пожежна безпека» ДСТУ 2272:2006.

До виконання робіт залучаються люди інженерно-технічного складу, які знають принцип дії концентратора, інструкцію з технічної експлуатації, інструкцію з техніки безпеки та здавши залік з техніки безпеки і пожежної безпеки.

4.4.1 Вимоги безпеки перед початком роботи

4.4.1.1 Уважно оглянути робоче місце, прибрати всі предмети, що заважають роботі.

4.4.1.2 Оглянута устаткування, переконатися у відсутності зовнішніх ушкоджень, надійності заземлення, візуально перевірити його справність. Заземлення устаткування повинно провадитися поза залежністю від ступеня небезпеки приміщення, у якому проводяться роботи.

4.4.1.3 Забороняється вмикати концентратор у несправному стані.

4.4.1.4 При виявленні несправностей повідомити старшому інженеру і приступати до роботи тільки після їхній усунення.

4.4.2 Вимоги безпеки під час роботи

4.4.2.1 Включити систему відповідно до інструкції з експлуатації.

4.4.2.2 При відсутності підтвердження про вмикання або наявність сигналу про несправність, доповісти старшому інженеру про несправність і приступити до її усунення після вимикання системи.

4.4.2.3 Тільки з'явиться в системі живлення або інших блоках тріскотняви, характерного для високовольного пробою, або диму, негайно виключити напругу живлення.

4.4.2.4 При установці переносних приладів і вимірах необхідно виключати торкання струмоведучих частин з небезпечною напругою;

4.4.2.5 Забороняється знімати захисні елементи конструкції, що закривають доступ до струмоведучих частин.

4.4.2.6 Забороняється приєднувати і від'єднувати модулі, з'єднувачі, що знаходяться під напругою.

4.4.2.7 При проведенні регламентних робіт уважно перевірити працездатність усіх підсистем у всіх можливих режимах роботи.

4.4.2.8 У разі виникнення пожежі блоку керування концентратором, в першу чергу його необхідно вимкнути з електричної мережі.

4.4.2.9 У випадках виникнення пожежі викликати службу пожежної охорони, доповісти змінному інженеру і приступити до гасіння пожежі після попереднього знеструмлення всіх систем

4.4.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт

4.4.3.1 Перевірити працездатність системи, що працює в автоматичному режимі.

4.4.3.2 При зміні чергового складу, повідомити новому складу про всі минулі неполадки і несправності в роботі системи і зафіксувати їх у журналі.

4.4.3.3 Упорядкувати робоче місце після виконання регламентних робіт.

4.4.4 Вимога при аварійних ситуаціях

В випадку виникнення пожежі визвати службу пожежної охорони, докласти старшому інженеру і приступити до гасіння пожежі після обезструмлення всіх систем.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1 Вплив БПЛА на тварин

Обмежені дослідження, які були проведені, свідчать про те, що дрони дійсно впливають на тварин, але необхідні додаткові дослідження. Два великих дослідження показали, що політ безпілотників навколо тварин може призвести до зміни поведінки та збільшення частоти серцевих скорочень, що може вказувати на стрес, спричинений звуковим та/або візуальним силуетом дрона. Дикі тварини, які використовують повітряні та наземні середовища існування, частіше демонструють поведінкову реакцію на дрони, ніж ті, що живуть у водних середовищах існування.

Дрони літають на низькій висоті над рівнем землі, де мешкає більшість літаючих видів. Однак існує мало дискусій щодо їх можливого впливу на дику природу, і це вже викликало заклики до вивчення та мінімізації безпілотників, які заважають дикій природі. Наукової літератури на цю тему небагато, але вона свідчить про те, що існує поведінкова реакція дикої природи на дрони. Більше того, можуть бути й інші невимірні наслідки для тварин (наприклад, фізіологічні реакції, зниження фізичної форми), а невизначеність щодо того, як дрони впливають на дику природу, може обмежити їх наукове використання.

Більше всього, БПЛА впливають на поведінку тварин. Наприклад, тварини при зустрічі з дроном можуть на нього напасти, що може негативно вплинути на їх здоров'я з-за наявності у дроні лопастей що обертаються на великій швидкості, можуть почати намагатися втекти, що може призвести до сильного стресу або зіткнень з об'єктами навколишнього середовища. Також, тварини можуть пошкодити обладнання дрона, або почати його їсти або гризти, що може бути смертельно небезпечним бо дрони містять в собі багато канцерогенних матеріалів.

БПЛА можуть пошкоджувати екосистему та заважати тваринам при взаємодії з об'єктами природи. Наприклад, приземляючись на землю, дрон може пошкодити деякі рослини, або знищити певну кількість комах. Також, майже всі БПЛА використовують високообертові двигуни (найчастіше 4 і більше), що створюють

досить сильний шум для тварин, а також створюють високий електромагнітний фон при використанні радіообладнання (апаратура телеметрії, керування і т.п.).

Ще одним, дуже вагомим та важливим є фактор утилізації дронів. Дуже часто дрони або викидають після закінчення строку служби, або, найчастіше, життєвий цикл дрона закінчується тим, що людина його просто губить на деревах, у полях і т.п., тому всі ті матеріали, з яких складається сучасний дрон, повинні розкластися у живій природі. Пластик, елементи батарей та акумуляторів, гума та інші “довгоживучі” матеріали забруднюють досить велику територію, викликаючи у тварин отруєння, різні захворювання та мутації.

5.2 Дія шуму на живі організми

5.2.1. Дія шуму на організм людини

Шум - це гучний звук, що викликає дискомфорт і негативно впливає на фізичний та психологічний стан людини при зміні поведінки. Потенційно патогенні збудники беруть участь у формуванні загальної адаптації до постійного стресу.

Шум включає звук майже всіх частотах у чутному діапазоні. Шуми відрізняються різним розподілом рівнів звукового тиску за частотами та їх тимчасовим розподілом.

Шуми можуть бути такими:

- Низькочастотний шум (частоти нижче 300 Гц)
- Середньочастотний шум (300-800 Гц)
- Високочастотний шум (800 Гц)

Враховуючи ці властивості слуху, була встановлена логарифмічна шкала для вимірювання рівня звукового тиску шуму. Кожен рівень цієї шкали відповідає 10-кратному зміні інтенсивності шуму і називається білим (В). Так, якщо інтенсивність одного звуку в 10 разів перевищує інтенсивність другого звуку, то другий звук вважається голосніше на 1 Б, якщо в 100 разів (у 2 Б рази, в 10 000 разів - в 4 Б і т.д.). Насправді ми виявили, що значення одну десяту білого децибелу (дБ) корисніше. Це не абсолютна одиниця, а відносна одиниця, яка базується на використанні логарифму відношення інтенсивності даного звуку (i) до порогової інтенсивності (i_0). За цей поріг приймається інтенсивність, що відповідає звуковому тиску 0.4×10^{-4} Па або потужності

близько 10^{-16} Вт. Вважається, що це мінімальна інтенсивність, яку сприймає людське вухо.

Патогенна дія шуму багатогранна і до кінця не вивчена. Шум ушкоджує гени не безпосередньо, а побічно через метаболізм. Шум може бути тривожним, дратівливим та шкідливим для вашого здоров'я. Захисна реакція людини на шум зумовлена розвитком гіперзбудливих або гальмівних процесів у центральній нервовій системі (ЦНС).

Велика кількість звукових сигналів, що досягають кори головного мозку, викликає тривогу, страх та передчасну втому. Вплив шуму на людину варіює від суб'єктивного подразнення до об'єктивних змін у центральній нервовій, слуховій, серцево-судинній та ендокринній, травній та інших органах та системах. Першими показниками шкідливого впливу шуму є скарги на дратівливість, занепокоєння та порушення сну. Тривале вплив шуму впливає як на функціональний стан фізіологічних систем організму, а й у психологічний стан. Шум викликає зміни у функціонуванні надниркових залоз та гіпофіза, які відбиваються на розвитку пристосувальних та регуляторних реакцій в організмі.

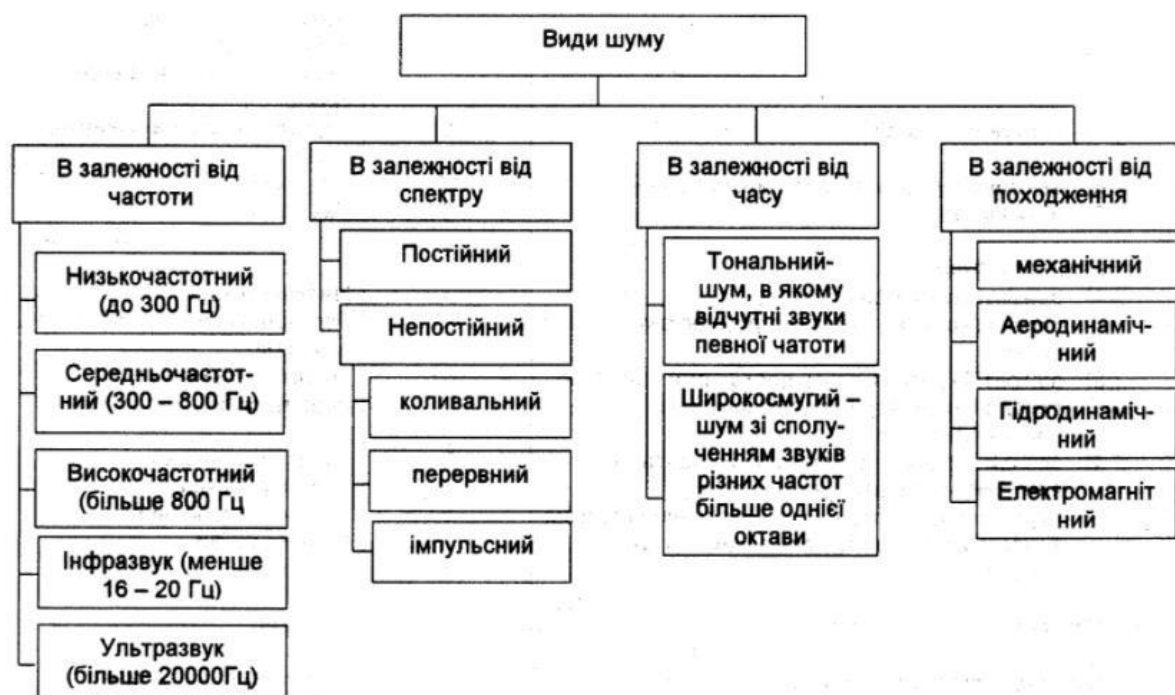


Рис.5.1. Види шуму

Постійним шумом називають той шум, рівні звуку якого змінюються не більше ніж на 5 дБ протягом робочого дня. Шум вважається непостійним, коли рівні шуму протягом робочого дня (робочої зміни) поступово змінюються на 5 дБ і більше.

Уривчастий шум можна розділити на вібраційний шум, уривчастий шум і імпульсний шум.

Вібраційний - шум, рівень якого безперервно змінюється з часом.

Уривчастий - шум, рівень якого змінюється поступово (понад 5 дБ), з інтервалами тривалістю понад 1 секунду, протягом яких рівень шуму залишається постійним.

Імпульс - шум, що складається з однієї чи кількох нот, кожна має тривалість менше 1 секунди.

Джерелами механічних шумів є механічні вібрації на поверхнях машин та обладнання, удари від деталей та конструкцій.

5.2.2. Дія шуму на тварин

Протягом десятиліть, біорізноманіття зазнавало величезних втрат у всьому світі. Види та популяції зникають, ареали видів змінюються (як скорочуються, так і розширюються) з безпрецедентною швидкістю, а спільноти витісняються інвазивними чужорідними видами. Так, зростання міст є однією з основних причин втрати біорізноманіття, оскільки воно руйнує природні середовища проживання, фрагментує екосистеми, що залишилися, і спричиняє різні типи забруднення, наприклад, стоки, відходи та штучне забруднення. вплив світла на рослини і тварин. Подібним чином створювані людиною звуки є повсюдними в містах, походять від дорожнього руху та іншої діяльності (промислової, комерційної тощо), і вони можуть досягати незаселених місць. Антропогенний шум також може виникати далеко від міст (наприклад, туризм у національному парку, військовий гідролокатор в океані, цивільний літак у небі).

Багато досліджень показали, що такі звуки можуть мати значний вплив на тварин. Однак звук сам по собі не є проблемою. Більшість видів чують і видають звуки. Звуки часто використовуються для спілкування між тваринами партнерами чи родичами, або для виявлення здобичі чи хижаків. Проблема виникає, коли звуки перетворюються на «шум», що залежить від кожного виду (порог чутливості) і від типу генерованого впливу (наприклад, занепокоєння, уникнення, пошкодження). У цьому випадку можна говорити про «шумове забруднення». Наприклад, створювані людиною звуки можуть маскувати та перешкоджати звукам тварин та/або чуттю

тварин, і було показано, що вони впливають на спілкування, використання простору і відтворення. Ця проблема стосується багатьох біологічних груп, таких як птахи, амфібії, рептилії, риби, ссавці і безхребетні. Він охоплює декілька типів екосистем, включаючи наземні, водні та прибережні екосистеми. Багато типів звуків, створених людиною діяльністю, можуть представляти форму шумового забруднення для біорізноманіття, включаючи дорожній рух, кораблі, літаки і промислову діяльність. Шумове забруднення також може діяти в синергії з іншими завадами, наприклад, світловим забрудненням.

Шум - це відволікаючий, страшний або фізично болючий звук. Вплив шуму на тварину варіюється від відволікання та страху до проблем із пам'яттю, постійного пошкодження слуху та серцевих захворювань.

Ненормально гучний шум, наприклад, на музичних концертах або будівельних майданчиках, контролюється для захисту людського слуху. Але для тварин шум не регламентований.

Дослідження прагнуть виміряти гучність шуму в децибелах (дБ). Але тип джерела шуму, частота (висота), швидкість і тривалість також можуть впливати на сприйняття шуму слухачем.

Людиноподібні мавпи мають такі ж слухові здібності, як і люди, але інші представники тваринного світу сприймають шум зовсім по-іншому. Слух коливається від ехолокації ультразвуку дуже високої частоти ($>20\,000$ Гц) у кажанів і дельфінів до інфразвуку дуже низької частоти (<20 Гц) у слонів. Деякі безхребетні, наприклад павуки-мисливці, виявляють звук від вібрації за допомогою крихітних волосків на ногах. Важко визначити, наскільки тварина чутлива до шуму, але найважливішим є те, чи знаходиться шум в її оточенні в межах їхнього діапазону слуху, а не те, чи має тварина високу чи низьку частоту.

Через брак досліджень немає достатньо інформації про те, як саме шум впливає на тварин.

Гучний шум може назавжди пошкодити слух лабораторних гризунів. Можна припустити, що цей вплив є болісним, тому що щури, піддані впливу гучного шуму, поведуться по-різному з і без знеболюючих препаратів. Результати лабораторних досліджень на гризунах можна поширити на інших ссавців, але є відомі відмінності в здатності слуху в різних тварин. Дикі тварини страждають від хронічного стресу, мають проблеми з фертильністю та змінюють шляхи міграції у відповідь на шум. Тварини, які перебувають у замкнутому режимі, часто піддаються впливу високого рівня шуму, створюваного людиною, від якого вони не можуть уникнути.

Дослідження показують, що шум викликає у тварин біль, страх і когнітивні проблеми. Наприклад, у риб вібрація від сильного шуму може пошкодити плавальний міхур, що, у свою чергу, впливає на їхній слух і плавучість.

Нечутний шум (вібрація) також може завдати шкоди тваринам через фізичне струшування їхніх внутрішніх частин тіла. Сільськогосподарські тварини відчувають сильний рівень вібрації під час транспортування.

Один галасливий захід, такий як місцевий музичний фестиваль або екстремальна погода, може викликати тривалий страх у тварин. Зв'язок між шумом і страхом був добре вивчений на собаках за допомогою записів шуму під час грози. Така чутливість до шуму, яка вражає до 50% домашніх собак, викликається неочікуваними звуками. Це змушує тварин ховатися або шукати розради людини. Кури, вирощені на фермі, піддаються впливу шуму автомобіля та навіть музики, також завмирають від страху.

Примати, птахи та жаби можуть за короткий час звикнути до шумного середовища, створюючи звуки голосніше, подібно до підвищення голосу людини у шумному середовищі. Звісно, це часто може призводити до проблем з органами відтворення голосу.

Тривалий вплив гучного шуму знижує здатність до навчання та пам'яті лабораторних мишей. Зв'язок між когнітивними здібностями та тривогою у мишей є прямим, оскільки загалом високий рівень тривожності знижує їх інтелектуальну здатність.

5.3 Вплив електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону на тварин

Вплив радіочастотних (РЧ) електромагнітних полів (ЕМП), зокрема від телекомунікаційних джерел, є одним із найпоширеніших і найшвидше зростаючих антропогенних факторів навколишнього середовища. У багатьох країнах люди захищені від надмірного опромінення РЧ-ЕМП стандартами безпеки, які базуються на рекомендаціях Міжнародної комісії із захисту від неіонізуючого випромінювання (ICNIRP). Рекомендації ICNIRP базуються на знаннях про те, як РЧ-ЕМП впливають на організм людини, однак наразі не існує визнаних міжнародних рекомендацій щодо захисту тварин і рослин. Чи є рекомендації ICNIRP для людини адекватними для захисту навколишнього середовища, є предметом активних дискусій.

Вплив радіочастотних (РЧ) електромагнітних полів (ЕМП) є одним із найпоширеніших та найшвидше зростаючих антропогенних факторів навколишнього середовища. Незважаючи на те, що радіочастотне ЕМП є частиною природи (випромінюється такими джерелами, як сонце, земля та іоносфера), технологічний прогрес останнього століття зробив штучні джерела основним джерелом впливу радіочастотного ЕМП на навколишнє середовище. Штучні джерела радіочастотного ЕМП в основному використовуються для телекомунікаційних цілей, таких як радіо- та телемовлення, мобільний телефон, супутникова передача, Wi-Fi та численні інші засоби бездротового зв'язку. Інші

сфери використання РЧ-ЕМП включають безпеку та навігацію (наприклад, радіочастотна ідентифікація та радар), промислове застосування (наприклад, опалення та зварювання) та використання в сільському господарстві (наприклад, боротьба з комахами та обробка продуктів). Глобальне поширення цих джерел, особливо для телекомунікацій, означає, що антропогенне РЧ-ЕМП є всюдисущим у навколишньому середовищі. Громадський резонанс щодо розвитку мережі 5G набув форми груп проти 5G, петицій до урядів і численних протестів по всьому світу. Тварини та рослини мають природну реакцію на певні типи ЕМП, включаючи міграційні моделі та запилення.

РЧ ЕМП фізично визначається як передача енергії (або випромінювання) радіохвилями в діапазоні частот від 100 кілогерц (кГц) до 300 гігагерц (ГГц). Різні джерела РЧ-ЕМП працюють у різних діапазонах частот у всьому РЧ-діапазоні. У телекомунікаціях, наприклад, АМ-радіо працює в діапазоні від 100 до 3000 кГц; FM-радіо та УКХ-телебачення від 30 мегагерц (МГц) до 300 МГц; УВЧ-телебачення та мобільні телефонні мережі 3G/4G між 300 МГц і 3 ГГц. Мережа 5G наразі працює на частотах 3,6 ГГц і 26–28 ГГц, і в майбутніх мережах мобільного зв'язку планується використовувати більш високі діапазони частот понад 60 ГГц. Інтенсивність опромінення РЧ-ЕМП залежить від рівня потужності джерела та виражається як сила компонента електричного або магнітного поля в одиницях «вольт на метр» (В/м) або «ампер на метр» (А/м) відповідно. Іншим поширеним показником, який використовується для вираження інтенсивності РЧ-ЕМП, є щільність потужності в одиницях ват на квадратний метр (Вт/м²), і ці показники взаємопов'язані. Інтенсивність РЧ-ЕМП дуже швидко зменшується з відстанню, тому, незважаючи на те, що в навколишньому середовищі є багато джерел, саме безпосередня близькість до певного джерела (наприклад, поруч із антеною радіомовлення) зазвичай домінує в опроміненні.

РЧ-ЕМП класифікується як неіонізуюче випромінювання, і, на відміну від іонізуючого випромінювання, воно не несе достатньо енергії для іонізації атомів або молекул (тобто видалення електронів з їхньої орбіти), що може змінити хімічний склад матеріалу. Неіонізуюче випромінювання має меншу енергію, але може збуджувати молекули та атоми, змушуючи їх вібрувати швидше. Взаємодія радіочастотного ЕМП із біологічним матеріалом залежить від ряду факторів, включаючи частоту, інтенсивність і тривалість опромінення, а також від розміру та форми приймаючого матеріалу та його складу з точки зору його сприйнятливості до ЕМП. (часто називають діелектричними характеристиками). Коли біологічний об'єкт піддається впливу РЧ-ЕМП, частина енергії відбивається, а частина поглинається об'єктом. Радіочастотні поля стають менш проникливими в біологічну тканину зі збільшенням частоти, а для частот вище 6 ГГц глибина проникнення є відносно невеликою та міститься поверхнево на поверхні біологічного матеріалу. Радіочастотна енергія, яка поглинається біологічним матеріалом, виражена питомою

швидкістю поглинання в одиницях ват на кілограм (Вт/кг), викликає рух молекул і електрично заряджених частинок, що, у свою чергу, створює тепло. Вплив достатньо високих рівнів РЧ-ЕМП може надмірно нагріти біологічну тканину та потенційно спричинити її пошкодження; це часто називають «тепловим ефектом» РЧ-ЕМП. Вплив РЧ-ЕМП також індукує електричні поля всередині тіла, а на частотах нижче приблизно 10 МГц високі рівні впливу можуть стимулювати збудливі тканини, такі як нерви та м'язи.

Вплив радіочастотних електромагнітних полів у навколишньому середовищі від різних (переважно телекомунікаційних) джерел, як правило, низький і значно нижчий за межі безпеки ICNIRP. Опромінювання, що перевищує обмеження ICNIRP, може відбуватися поруч із деякими джерелами, такими як базові станції мобільних телефонів, радіомовні антени та радари. Ці зони, як правило, недоступні для людей, але в них можуть проникнути такі тварини, як птахи та комахи. Слід зазначити, що рекомендації ICNIRP ґрунтуються на знаннях про поглинання радіочастот людським тілом, наприклад, стосовно механізмів терморегуляції внутрішньої температури тіла людини. Тварини, такі як комахи та певні типи рослинних структур, не мають внутрішніх засобів для терморегуляції, і вони розробили інші стратегії, щоб протистояти впливу тепла, включно з радіочастотними полями, що перевищують межі ICNIRP. Незважаючи на це, наразі не існує визнаних міжнародних вказівок щодо захисту тварин і рослин.

Багато видів флори та фауни через унікальну фізіологію та середовище існування чутливі до екзогенного ЕМП таким чином, що перевершує реакцію людини. Це може призвести до складних ендегенних реакцій, які дуже варіабельні, здебільшого невидимі та є можливим фактором вимирання видів, іноді локальним. Досліджено нелюдські механізми магніторецепції. Численні дослідження на всіх частотах і таксонах показують, що нинішній антропогенний ЕМП низького рівня може мати незліченну кількість несприятливих і синергічних ефектів, у тому числі на орієнтацію та міграцію, пошук їжі, розмноження, спаровування, будівництво гнізд і барлог, підтримку території та захист, а також на життєздатність, довговічність і само-виживаність. Вплив спостерігався у таких ссавців, як кажани, олені, китоподібні та ластоногі серед інших, а також у птахів, комах, амфібій, рептилій, мікробів і багатьох видів флори. Цито- та генотоксичні ефекти вже давно спостерігаються в лабораторних дослідженнях на моделях тварин, які можна екстраполювати на дику природу. Незвичайні багатосистемні механізми можуть вступати в гру з нелюдськими видами - в тому числі у водному середовищі - які покладаються на природні геомагнітні поля Землі для отримання важливої для підтримки життя інформації. Втрата дикої природи часто залишається непомітною та недокументованою, доки не досягнуто переломних моментів. Настав час визнати ЕМП навколишнього середовища новою формою забруднення та розробити правила для регуляторних органів, які визначають повітря як «середовище існування», щоб

ЕМП можна було регулювати, як і інші забруднювачі. Стандарти тривалого хронічного впливу ЕМП низького рівня, яких наразі не існує, повинні бути встановлені відповідним чином для дикої природи, а закони про навколишнє середовище повинні суворо виконуватися.

5.4 Способи захисту від шуму та електромагнітного випромінювання

Захист від шуму використовується для усунення шумового забруднення навколишнього середовища. Захист від шуму – це комплекс заходів на виробництві, на транспорті, цивільному та промисловому будівництві, на дорогах, вулицях населених пунктів. На практиці плани забудови та методи будівництва (застосування звукопоглинаючих матеріалів, раціональне розміщення будівель, створення протишумових зазорів – перенесення житлових будинків у сусідні райони, шумні виробництва далеко від густонаселених районів, облаштування звуконепроникних віконних клапанів тощо), спеціальні шумозахисні екрани (земляні вали, стіни різних конструкцій, що шумовідбивають, як правило, створення екранів уздовж вулиці у вигляді безшумних - будинки - магазини, склади, гаражі), зелені насадження (переважно в літній період при розмірах ефективних просторів шириною понад 50 м), навішування величезних або профнастилових парканів на балкони та лоджії, заходи щодо «взяття» залізниці в тунелі і т.д.

У зарубіжних країнах, особливо в Німеччині, на багатьох військових та цивільних аеродромах, що приймають реактивні літаки, створено шумозахисні зони, обмежено льотну діяльність (заборонено польоти в нічний час), надзвуковий політ обмежений за часом, висотою та швидкістю. Технічні методи зниження шуму застосовуються на наземному транспорті (автомобільному та залізничному): застосування спеціального звукопоглинаючого асфальту в густонаселених місцях (у такому асфальті, 25% об'єму складають порожнини, і виступають як демпфери звуку, у звичайних максимально 6%). Застосування цих заходів дозволило знизити рівень шуму на дорогах Німеччини на 4-6 дБ. В Україні наразі розвиваються методи зменшення шумів на автомагістралях, у першу чергу завдяки звуковідбиваючим екранам.

Дерева та чагарники вздовж траси, особливо клен (знижує рівень шуму на 15,5 дБ), тополь (до 11 дБ), липа (до 9 дБ), ялина (до 5 дБ). Все це значно знижує шумове забруднення навколишнього середовища та знижує негативний вплив на здоров'я тварин. Товстий живий паркан може послабити

шум від машини в 10 разів. Дерев'яні породи працюють краще, ніж цегляні чи бетонні стіни. Крім того, вертикальне озеленення та інші види озеленення вздовж будинків та тротуарів можуть допомогти знизити нагрівання стін та дорожніх покриттів у 10 та більше разів. Значно знижує забруднення повітря автомобілями та підприємствами, а саме головне, створює естетику та почуття комфорту для людини і відтворює знайоме середовище для тварин.

Захист тварин від електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону на сьогоднішній день полягає у першу чергу в створенні стандартів, нормативних документів та регулюючих актів які захищали би нашу екосистему, флору і фауну від шкідливого впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону.

Наразі, обмежити розповсюдження радіохвиль у природній зоні можна завдяки можливості локалізації джерела випромінювання, тобто встановлення антен у труднодоступних для тварин місцях, щоб забезпечити щонайбільшу дистанцію від живої істоти до джерела випромінювання. Також, потрібне обмеження секторів покриття високо потужних антенних станцій, наприклад у рекреаційних зонах, природніх парках, заповідниках та заказниках, лісів та лісо- та сільськогосподарств.

Багато тварин, особливо птахів, комах або дрібних гризунів можуть зазнавати дуже шкідливого впливу від антенного електромагнітного випромінювання, у випадках коли вони можуть тим чи іншим способом потрапити на сам опромінювач. Наприклад, комахи та птахи, які сідають прямо на антени, або гризуни, що можуть залізти у середину високочастотної апаратури. Задля неможливості потрапляння тварин у ці небезпечні зони, обладнання такого типу повинно захищатись спеціальними сіточками або парканчиками.

5.5 Висновок

У даному розділі було розглянуто чинники негативного впливу БПЛА та факторів, що є спотвореними використанням БПЛА на навколишнє середовище. Було проаналізовано вплив безпілотної авіації на тварин, а також розглянуто негативні фактори шуму та електромагнітного випромінювання. Також, було зроблено висновки та сформовано методи та способи захисту флори та фауни від шкідливих чинників.

ВИСНОВКИ

У своїй дипломній роботі, мною було детально проаналізовано комунікацію по радіоканалу між безпілотними літальними апаратами та наземною станцією а також детально розібрано та проаналізовано протоколи комунікації, стандарти модуляції, формати даних та інтерфейси, що використовують безпілотні літальні апарати та їх термінали керування у бортовому обладнанні. Також, було обрано та розглянуто необхідне обладнання для створення на основі нього антенної решітки, що зможе автоматично змінювати площину апертури для досягнення максимальної якості сигналу, таким чином підстроюючись під траєкторію польоту безпілотного літального апарату. Було розроблене програмне забезпечення для мікроконтролеру серії STM32, за допомогою якого здійснюється розрахунок необхідних параметрів азимутального та меридіонального кутів повороту антенної решітки, а також програмна логіка керування електромеханічним оберտальним пристроєм.

Радіозв'язок має дуже велике значення в індустрії безпілотних літальних апаратів. Оперативна та надійне отримання та передача інформації є одним з найважливіших завдань телекомунікації. Дані, що можна передавати завдяки адаптивній антенній системі (а саме, наприклад, відеозв'язок) може надавати дуже цінну інформацію у реальному часі, ведучи спостереження за об'єктами на безпечній дистанції. На сьогоднішній день, на ринку є потреба саме у способі комунікації з безпілотними літальними апаратами саме на великих дистанціях, без суттєвих втрат сигналу та можливості його перехоплення третіми сторонами.

Провівши аналіз різних типів та протоколів модуляції сигналу, було зроблено остаточний вибір на GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying), як одного з самих оптимальних, надійних і найбільш ефективних алгоритмів сучасності, а також обрано мікроконтролер STM32F411RE як оптимальний пристрій для базової обробки сигналів антенної решітки, та керування електромеханічним пристроєм обертання. Також, як результат дипломного проекту, було написано спеціальне програмне забезпечення для заданого мікроконтролеру, щоб керувати оберտальним механізмом в залежності від рівня сигналу на лініях.

Для написання програмного алгоритму, використовувались класичні методи цифрової обробки сигналів, методи розрахунку меридіонального та азимутального кутів повороту, а також технічна специфікація мікроконтролеру, його підключених модулів та іншої необхідної периферії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Horowitz, Michael C.: "Do Emerging Military Technologies Matter for International Politics?". Annual Review of Political Science. 23, 2020: 385–400 с.
2. ArmyInform [Електронне джерело] –21.12.2020 - Турецька компанія поставила замовникам, зокрема й Україні, 154 БПЛА Bayraktar TB2 – режим доступу: <https://armyinform.com.ua/2020/12/21/tureczka-kompaniya-postavyla-zamovnykam-zokrema-j-ukrayini-154-bpla-bayraktar-tb2/> (дата звертання 01.10.2022) – назва з екрана
3. HoneyWellAerospace [Електронне джерело] – 04.03.2018GeneralAtomics MQ-9 Reaper – режим доступу: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/industry/defense/defense/mq-9-reaper>(дата звертання 01.10.2022) – назва з екрана
4. NGPhoto [Електронне джерело]–01.02.2019ElbitHermes– режим доступу: <https://www.ngphoto.biz/>(дата звертання 01.10.2022) – назва з екрана
5. WlikiPedia [Електронне джерело] – 13.04.2022BayraktarMiniUAVoftheTurkishLandForces – режим доступу: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/ISTANBUL_DHA_GOZCU1.jpg(дата звертання 01.10.2022) – назва з екрана
6. DefenceImagery [Електронне джерело]–13.02.2013A BlackHornetnanohelicopterunmannedaerialvehicle (UAV) – режим доступу: <http://www.defenceimagery.mod.uk/fotoweb/fwbin/download.dll/45153802.jpg>(дата звертання 02.10.2022) – назва з екрана
7. WlikiPedia [Електронне джерело] – 2008TeledyneRyanFirebeeUAV (targetvariant, IDFdesignationShadmit) atIAFmuzeun, Hatzerimairbase, Israel – режим доступу: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Teledyne-Ryan-Firebee-hatzerim-1.jpg?20060310174513>(дата звертання 02.10.2022) – назва з екрана
8. CenosPlatform [Електронне джерело] –21.06.2021 Droneantennatypes&simulation – режим доступу: <https://www.cenos->

platform.com/post/drone-antenna-types-simulation(дата звертання 02.10.2022) – назва з екрана

9. Erasmus+ Programme of the European Union 2020: “UAV Data Transmission and Protocols” – 30 с.

10. Robotics StackExchange [Електронне джерело] –30.08.2014Pulse Position Modulation as used in RC controls – режим доступу: <https://robotics.stackexchange.com/questions/4456/pulse-position-modulation-as-used-in-rc-controls>(дата звертання 03.10.2022) – назва з екрана

11. Science Direct [Електронне джерело]–2013 Pulse Code Modulation – режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-code-modulation>(дата звертання 03.10.2022) – назва з екрана

12. Torrieri, Don. 2018: Principles of Spread-Spectrum Communication Systems, №4, 2005: 343 с.

13. Techopedia [Електронне джерело] –11.11.2016 – Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) -режим доступу: <https://www.techopedia.com/definition/14804/direct-sequence-spread-spectrum-dsss> (дата звертання 03.10.2022) - назва з екрана

14. Kennedy, G.; Davis, B.: “Electronic Communication Systems (4th ed.).”. McGraw-Hill International. ISBN 978-0-07-112672-4. – 509 с.

15. Semtech [Електронне джерело] –WhatisLoRa? – режимдоступу: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>(дата звертання 03.10.2022) - назва з екрана

16. ElectronicsNotes [Електронне джерело] - WhatisOFDM: OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing – режимдоступу: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-what-is-tutorial-basics.php> (дата звертання 03.10.2022) - назва з екрана

17. SilvusTechnologies [Електронне джерело] – IntroductiontoCOFDM – режим доступу: <https://silvustechologies.com/why-silvus/technology/introduction-to-cofdm/> (дата звертання 03.10.2022) - назва з екрана

18. Chimera.labs.oreilly.com [Електронне джерело]–17.04.2014 - 802.11ac:A SurvivalGuide – режим доступу: <https://web.archive.org/web/20170703105148/http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234>

000001739/ch04.html (архівований ресурс) (дата звертання 04.10.2022) - назва з екрана

19. How-To-Geek [Електронне джерело] – 11.04.2022 - WhatIs GPIO, andWhatCanYouUseItFor? – режим доступу: <https://www.howtogeek.com/787928/what-is-gpio/> (дата звертання 04.10.2022) - назва з екрана

20. Raspberry Pi [Електронне джерело] – Raspberry Pi hardware – режимдоступу: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>(дата звертання 04.10.2022) - назва з екрана

21. Motorola, Inc: “SPI Block Guide”№ S12SPIV3/D: 2003–17 с.

22. Total Phase [Електронне джерело] – 01.06.2013 - 7-bit, 8-bit, and 10-bit I2C SlaveAddressing – режим доступу: <https://web.archive.org/web/20130601201106/http://www.totalphase.com/support/kb/10039/> (архівований ресурс) (дата звертання 05.10.2022) - назва з екрана

23. Electronics StackExchange [Електронне джерело] –06.11.2012 - Is there any definitive I2C pin-out guidance out there? Not looking for a"STANDARD" – режим доступу: <https://electronics.stackexchange.com/questions/47056/is-there-any-definitive-i2c-pin-out-guidance-out-there-not-looking-for-a-stand/48343#48343> (дата звертання 06.10.2022) - назва з екрана

24. Hackaday [Електронне джерело] – 08.02.2017 - TAKING THE LEAP OFF BOARD: AN INTRODUCTION TO I2C OVER LONG WIRES – режим доступу: <https://web.archive.org/web/20170816012615/http://hackaday.com/2017/02/08/taking-the-leap-off-board-an-introduction-to-i2c-over-long-wires/> (архівований ресурс) (дата звертання 06.10.2022) - назва з екрана

25. Philips Semiconductors: “I²C Address Allocation Table”1999

26. Adam Osborne: “An introduction to Microcomputers Volume”, Osborne-McGraw Hill Berkeley California USA, 1980: 116-126 с.

27. Maxim Integrated [Електронне джерело]–07.08.2003 - Determining Clock Accuracy Requirements for UART Communications – режим доступу: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN2141.pdf>(дата звертання 06.10.2022) - назва з екрана

28. Щербина О.А.: “МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ АНТЕННИХ СИСТЕМ РАДІОМОНІТОРИНГУ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ ТА ПРИДУШЕННЯМ ЗАВАД” – Дисертація, НАУ, 2021 – 166 с.