

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ КІБЕРБЕЗПЕКИ, КОМП'ЮТЕРНОЇ
ТА ПРОГРАМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ І.А. Жуков
(підпис)
« ____ » _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 123 «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

Тема: _____ «Технологія надійної комунікації модулів системи управління
_____ рухомим об'єктом»

Виконавець: _____ студент групи КС-231М Крант Даніїл Вячеславович
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: _____ к.т.н., доцент, доцент кафедри КСМ Гузій Микола Миколайович
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: _____
(підпис) _____ Малярчук В.О.
(ПІБ)

Засвідчую, що у дипломній роботі немає
запозичень праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Крант Д.В.
(підпис) (ПІБ)

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.А. Жуков

(підпис)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на виконання дипломної роботи

_____ Крант Даніїл Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Технологія надійної комунікації модулів системи управління
рухомих об'єктів

затверджена наказом ректора від « 25 » вересня 2020 року № 1793/ст.

2. Термін виконання роботи: з 05.10.2020 до 30.12.2020

3. Вихідні дані до роботи: Пропонування технології підвищення надійності передачі даних.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):
1. Безпілотні літальні апарати. 2. Бортові системи та засоби передачі даних між
блоками рухомого об'єкта. 3. Обґрунтування технології комунікації блоків системи
управління БПЛА.

5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:

Презентація Microsoft Office PowerPoint: 1. Базова модель об'єкту дослідження.
2. Параметри вибраного інструментарію дослідження. 3. Результати
дослідження.

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Ознайомитись з постановкою задачі дипломної роботи	05.10.2020- 06.10.2020	
2	Вивчити спеціальну літературу і технічну документацію	07.10.2020- 10.10.2020	
3	Провести аналіз наявних технологій передачі даних	11.10.2020- 15.10.2020	
4	Написати розділ 1 дипломної роботи	16.10.2020- 25.10.2020	
5	Провести аналіз бортових систем БПЛА	26.10.2020- 05.11.2020	
6	Написати розділ 2 дипломної роботи	06.11.2020- 25.11.2020	
7	Провести дослідження засобів компресії даних	26.11.2020- 30.11.2020	
8	Написати розділ 3 дипломної роботи	31.11.2020- 10.12.2020	
9	Підготувати графічний демонстраційний матеріал	11.12.2020- 20.12.2020	
10	Захистити дипломну роботу	21.12.2020- 22.12.2020	

7. Дата видачі завдання « 25 » вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи: _____
(підпис)

Гузій М.М.
(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання: _____
(підпис випускника)

Крант Д.В.
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Технологія надійної комунікації модулів системи управління рухомим об'єктом»: 90 с., 25 рис., 43 літературних джерела.

Об'єкт дослідження – системи управління рухомим об'єктом.

Предмет дослідження – технології комунікації систем управління.

Мета дослідження – створити надійну та ефективну систему комунікації блоків системи управління рухомим об'єктом.

Методи дослідження – аналіз існуючих архітектур будування мереж рухомих об'єктів, сигналів, що передаються модулями рухомого об'єкта, технологій їх компресії та передачі.

Досліджено та наведено переваги та недоліки різних підходів до будування мережі та використання різних технологій комунікації. Установлено, що завдяки використанню найбільш ефективних та сучасних методів компресії даних в процесі роботи, збору, та передачі інформації мережею можливо підвищити швидкодію та надійність системи. Запропоновано найбільш ефективна та надійна за результатами дослідження архітектура побудови системи управління рухомим об'єктом. За результатами досліджень було винайдено найбільш оптимальну з точки зору надійності та швидкості передачі даних технологія комунікації блоків рухомого об'єкта.

АРХІТЕКТУРА, МОДУЛЬНІСТЬ БПЛА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МОДУЛІ, МЕРЕЖА, СТИСНЕННЯ ДАНИХ, МЕРЕЖА, КОМУНІКАЦІЯ, НАДІЙНІСТЬ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ.....	13
1.1. Математична модель БПЛА.....	14
1.2. Безпілотні авіаційні системи.....	21
Висновки за розділом.....	28
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД БОРТОВИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ ПЕРЕДАЧІ МІЖ БЛОКАМИ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА	30
2.1. Огляд бортових інформаційних систем.....	30
2.1.1. Системи первинної інформації.....	31
2.1.2. Радіонавігаційні системи.....	32
2.1.3. Системи автоматичного пілотування	34
2.2. Критичні модулі забезпечення діяльності БПЛА.....	36
2.3. Спеціалізовані модулі для вирішення специфічних задач БПЛА.....	41
2.4. Організація комунікації із базовою станцією БПЛА.....	45
2.5. Компресія сигналу.....	49
2.6. Аналіз способів передачі даних.....	62
2.6.1. Дротові технології передачі даних.....	62
2.6.2. Бездротові технології передачі даних.....	67
Висновки за розділом.....	68
РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМУНІКАЦІЇ БЛОКІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БПЛА	70
3.1. Визначення ефективності алгоритмів компресії	70
3.2. Визначення надійності технологій передачі даних	76

3.2.1. Аналіз надійності технологій передачі даних <i>CAN</i>	77
3.2.2. Аналіз надійності технологій передачі даних <i>Wi-Fi</i> стандарту <i>IEEE</i> 802.11 <i>n</i>	79
Висновки за розділом.....	82
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

<i>AM</i>	–	<i>Amplitude Modulation</i>
<i>ARM</i>	–	<i>Advanced RISC Machine</i>
<i>ASCII</i>	–	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<i>BLDC</i>	–	<i>Brushless DC electric motor</i>
<i>CAN</i>	–	<i>Controller Area Network</i>
<i>CD-ROM</i>	–	<i>Compact Disc Read-Only Memory</i>
<i>FGK</i>	–	<i>Faller-Gallager-Knuth</i>
<i>FM</i>	–	<i>Frequency Modulation</i>
<i>FOC</i>	–	<i>Full Operational Capability</i>
<i>GIF</i>	–	<i>Graphics Interchange Format</i>
<i>IMU</i>	–	<i>Inertial Measurement Unit</i>
<i>INS</i>	–	<i>Inertial Navigation System</i>
<i>ISO</i>	–	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>JPEG</i>	–	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
<i>LIN</i>	–	<i>Local Interconnect Network</i>
<i>MPEG</i>	–	<i>Moving Picture Experts Group</i>
<i>OS</i>	–	<i>Operational System</i>
<i>PRU</i>	–	<i>Programmable Real Time Units</i>
<i>RGB</i>	–	<i>Red Green Blue</i>
<i>RISC</i>	–	<i>Reduced Instruction Set Computing</i>
<i>USB</i>	–	<i>Universal System Bus</i>
<i>WAV</i>	–	<i>Waveform Audio File</i>
БПЛА	–	Безпілотний Літальний Апарат
ЕРС	–	Електрорушійна Сила

ВСТУП

Надійність передачі інформації є одним з ключових параметрів технології передачі даних. Надійність передачі даних напряму корелює із поняттям гарантоздатності системи.

Гарантоздатність є складною властивістю системи надавати задані послуги (виконувати функції), яким можна виправдано довіряти; гарантоздатною є система, якій притаманна така властивість [18]. За роки концепція гарантоздатності знайшла певного розвитку як ключова у галузі критичних комп'ютерних систем. Природно, що оцінка та забезпечення гарантоздатності є за своєю суттю комплексною проблемою, оскільки:

- по-перше, гарантоздатність – це складна властивість, яка включає безвідмовність, готовність, здатність до обслуговування, достовірність, функціональну та інформаційну (конфіденціальність і цілісність) безпеку, а також, за певних умов, живучість; забезпечення необхідного рівня показників за кожною з них впливає на інші;

- по-друге, комп'ютерна систем є комплексом апаратних, програмних і мережевих компонент, працездатність яких може бути порушена внаслідок фізичних, проектних дефектів і дефектів взаємодії (з зовнішнім середовищем); зрозуміло, що необхідно урахувувати вплив кожної з цих компонент з урахуванням різних дефектів і різних принципів підвищення стійкості до них;

- по-третє, поведінку і забезпечення необхідних характеристик гарантоздатності слід розглядати у більш широкому контексті – контексті еволюції комп'ютерної системи та її середовища; йдеться про складні системи та інфраструктури («системи систем»), умови використання яких можуть змінюватися впродовж їх життєвого циклу.

У рамках роботи розглянемо технології надійної передачі даних між блоками системи управління безпілотним літальним апаратом. БПЛА може розглядатись як критичний об'єкт, що потребує гарантоздатної та надійної технології передачі даних.

За останні кілька років безпілотні літальні апарати (БПЛА) [7], також відомі як безпілотники, привернули величезну увагу в різних сферах. Вони особливо використовуються у військових завданнях моніторингу, а також віднедавна у цивільній сфері, наприклад, при доставці товарів (У 2013 році *Amazon* оголосила про подання близько 64 патентів із описом системи доставки на основі БПЛА, призначеної для безпечного отримання пакунків клієнтам менш ніж за 30 хв).

Інтерес галузі телекомунікацій до БПЛА також зріс у геометричній прогресії. Цьому сприяє здатність БПЛА до швидкого розгортання та ефективного переміщення, щоб забезпечити повсюдне з'єднання під час тимчасових подій з масовою аудиторією (спортивні події, фестивалі чи конгреси). БПЛА можуть також замінити пошкоджену комунікаційну інфраструктуру, у випадку стихійного лиха (землетрус, вулкан тощо).

На відміну від цього, наземні інфраструктури не пристосовані до надзвичайних ситуацій через їх обмежену мобільність, разом із їх високою вартістю та часом розгортання. Існує два типи БПЛА: перший, який називається висотні платформи, (*Google* використовує стратосферні аеростати для забезпечення доступу до Інтернету для непокритих зон. *Facebook Aquila* також розробляє альтернативне рішення, використовуючи цього разу літаючі крила з розмахом крил 42 м) [5], може досягати великих висот, що можуть перевищувати 10 км, та платформи з низькою висотою, що працюють на менших висотах.

У телекомунікаційній сфері платформи з низькою висотою зльоту можуть охоплювати географічні райони з високою пропускнуою здатністю та кращим використанням енергії/спектра. Тим часом платформи з високою висотою зльоту може забезпечити широкосмугове покриття, а також може служити супутниками на дуже низькій висоті. Таким чином, БПЛА на невеликій висоті, які також називаються безпілотними дрібними елементами, можуть працювати як літаюча базова станція для розповсюдження покриття зв'язку для наземних мобільних користувачів та покращення обслуговування користувачів.

Цей вид БПЛА може також виконувати технічне обслуговування або збирати інформацію з недоступних місць. Таким чином, БПЛА можна ефективно використовувати для збору даних з наземних / підводних датчиків .

Збільшення кількості підключених пристроїв призвело до потреби створення надійної технології передачі даних.

Сучасний рухомий об'єкт є складним багатофункціональним об'єктом, який містить велику кількість різноманітних електронних компонентів. Конструкція агрегатів дає можливість керувати великою кількістю різних вхідних і вихідних параметрів. У зв'язку з цим рухомий об'єкт розглядається як багатопараметричний об'єкт управління [10].

Для організації збору та обробки інформації під час роботи такого об'єкта потрібні електронні блоки управління і велика кількість датчиків. При цьому реалізація керуючого впливу за сигналами від блоків управління здійснюється спеціальними виконавчими механізмами. В даний час на БПЛА встановлюються різноманітні електронні блоки управління в системах приводу і ходової частини, в кабінах або салоні, для різних радіо, комунікаційних і навігаційних систем. Для передачі і обміну інформацією між різними системами і, відповідно, блоками управління використовуються цифрові шини передачі даних, які дозволяють зменшити загальну довжину застосовуваних на автомобілі електричних проводів, кількість датчиків, а також підвищити швидкість і якість інформації, що передається інформації.

У загальному сенсі комунікація (або передача даних) передбачає обмін інформацією. Добре відомо, як відбувається комунікація між людьми. Вона включає кодування, передачу і декодування осмислених повідомлень за допомогою мови. У світі існує безліч різних мов. Крім мовних комунікацій між людьми існують і інші способи комунікацій. Комунікації відбуваються також між електричними приладами, наприклад, електронними блоками управління для обміну даними. Передача даних між декількома комп'ютерами здійснюється за допомогою мережі.

При передачі даних між комп'ютерами в рамках мережі використовується якусь спільну мову (правила передачі даних), званий протоколом.

Особливістю сучасної техніки є цифрова, бінарна передача сигналу. Аналого-цифровий перетворювач перетворює значення сигналу в цифровий код.

Точність перетворення при цьому залежить від кількості використаних двійкових розрядів, так званих бітів. Електричний дріт, приєднаний до блоку обчислення (БО), вмикається і вимикається в швидшій послідовності, щоб передати цифровий код. Цей код можна тепер легко зберегти і передавати на інші БО автомобіля. Кодовані цифрові сигнали можуть легко і без втрат передаватися на інші БО. При цьому БО не потрібно з'єднувати між собою. Замість цього використовується принцип, вже довгий час застосовуваний в розподільних щитах. «Струмовидна шина» забезпечує електричні компоненти необхідною напругою. Електричні компоненти, образно кажучи, просто "насаджуються" на шину, як, наприклад, пасажирів автобуса розсідаються по вільним місцям. Така «Струмовидна шина» може використовуватися також і для розподілу цифрової інформації. З'єднання це позначається терміном "*Bus*", від англійського "*Bus-Bar*" – "Струмовидна шина". Загалом, "*Bus*" є системою проводки з відповідними органами управління. Вона служить для обміну даними між електронними компонентами. До недавнього часу в системах управління кожна інформація передавалася на свій власний проводу. Тим самим з кожної додаткової інформацією зростало число проводів і кількість контактів на роз'ємах БО. Тому подібний тип передачі інформації виправдовує себе тільки в випадку обмеженого обсягу переданих даних. Для вирішення завдання обміну великим об'ємом інформації треба було оптимальне технічне рішення, при якому електронна та електрична системи залишалися зручними для візуального спостереження і, разом, з тим не займали занадто багато місця. Сучасні рухомі об'єкти мають дуже складну мережеву структуру, що забезпечує передачу даних між різними БО.

В даний час під терміном «мережева структура рухомого об'єкту» маються на увазі не тільки різні системи проводів або шинної проводки, але і самі БО, а також правила комунікації та необхідне програмне забезпечення.

Швидкість передачі даних має певні межі. Перш за все, досконалий сигнал прямокутної форми можливий тільки теоретично. На практиці, через такі ефекти, як

інерція, самоіндукція і електромагнітне випромінювання, ми отримуємо швидше трапецевидне протікання сигналу.

Відстань між передавачем і приймачем грає велику роль. Так як опір провідника збільшується з його довгою, сила сигналу поступово зменшується.

Крім того, сигнал змінюється через електромагнітного випромінювання. Для забезпечення якості сигналу була б необхідна висока напруга. Це збільшило б, в свою чергу, споживання потужності, а також випромінювання. Крім того, збільшення напруги привело б до зменшення швидкості в зв'язку з інерцією. Для інтерпретації сигналу приймач з функцією прийому даних орієнтується на певну граничну напругу. Якщо сигнал в момент прийому перевищує або НЕ досягає відповідного граничного напруження, то він визначається як 0 або 1.

РОЗДІЛ 1

БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ

Безпілотний літальний апарат (БПЛА, також іноді скорочується як БЛА або «дрон» (від англ. *drone* – трутень)) – літальний апарат без екіпажу на борту. Створений для повітряної зйомки, спостереження та інших завдань, в реальному часі або за створеною місією. Нещодавно БПЛА стали важливим елементом у військовій та цивільній сфері. Окрім військових цілей, сьогодні БПЛА використовуються для наукових, комерційних та громадських цілей. Залежно з урахуванням різних потреб користувачів, винайдено багато типів БПЛА.

Отже, напрямки досліджень у домені БПЛА еволюціонують в міру збільшення типів і кількості БПЛА. Еволюція формується за рахунок збільшення і задоволення очікувань користувачів. В даний час багато університетів, державних установ, технологічних компаній, державних та приватних науково-дослідних організацій проводять дослідження залежно від їхніх інтересів. Але дослідження БПЛА розділені головним чином на дві області.

Перша стосується напрямків досліджень зосереджених на темі ефективного використання БПЛА. Ця область в основному досліджується державними установами, компаніями в оборонному секторі, університетами.

Друга область зосереджена на проблемах, пов'язаних з розвиток безпілотних систем транспортних засобів. Приватний сектор приймає активну участь у цій галузі. Природно, університети і дослідницькі установи також приймають участь у цьому процесі.

Незважаючи на те, що ці дві області можуть здатися тими що не перетинаються, проблема в одній галузі може мати значний вплив на іншу. Наприклад, рівень автономності БПЛА визначатиме типи місій, які може виконувати БПЛА. По суті, дослідницькі зусилля в обох сферах слугують спільній меті, тобто полягають у максимальній вигоді від цих машин як у військових, так і в цивільних цілях.

1.1. Математична модель БПЛА

Світова тенденція в цьому напрямку прагне до подання квадрокоптера як нелінійного об'єкта [10]. Цей підхід більш реалістичний. У зв'язку з цим пропонуємо нелінійну модель квадрокоптера з урахуванням зсуву центра ваги від його ідеального геометричного положення, яке збігається з положенням центру мас. Концепція зводиться до опису динамічної моделі використовуючи фізичні вирази, основним завданням є визначення динаміки та параметрів виконавчих механізмів, які мають важливе значення в випадку дослідження мультироторного БПЛА.

Такий підхід дозволяє спростити процес створення динамічної моделі нестабільної системи. Для моделювання були використані рівняння Ейлера-Лагранжа і рівняння, що описують роботу безколекторного двигуна постійного струму. Модель розроблена в даній роботі, передбачає наступні:

- конструкція передбачається жорсткою;
- конструкція передбачається симетричною;
- гвинти передбачаються жорсткими;
- тяга і опір, приймемо пропорційними квадрату швидкості пропелера;

Моделювання буде проводитись з використанням рівнянь Ейлера Лагранжа. Для опису положення і руху БПЛА в просторі використовують різні системи координат: інерційні, рухомі та нерухомі.

Вибір системи координат зазвичай обумовлений розв'язуваної завданням. У даній роботі розглянемо нормальну земну систему координат E і рухливу систему B . Земна система координат лежить на поверхні землі і осі фіксовані щодо її початку. Вісь Z спрямована вгору по прямий збігається з напрямком сили тяжіння. Осі Y і X лежать в горизонтальній площині, утворюючи праву прямокутну декартову СО.

Рухома система координат B . Це система координат осі якої збігаються з осями квадрокоптера. Її початок лежить в центрі маси квадрокоптера, а осі повернені на кути тангажу, крену і нишпорення щодо осей земної системи координат. орієнтація корпусу літального апарату в просторі задається обертанням R від B до E , де R є ортогональною матрицею обертання. Система координат відображена на рис 1.1.

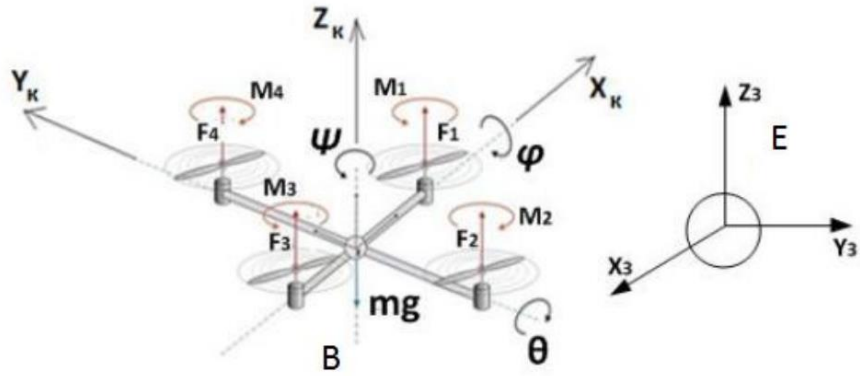


Рис. 1.1. Система координат БПЛА

Перша річ, що має бути розроблена після конструкції БПЛА і підготовки апаратного забезпечення системи управління – це льотне тестування для ідентифікації параметрів математичної моделі [9].

Загальна форма динамічних процесів задається рівнянням, де знаходяться змінні стану у стовпці вектор x , а керуючі змінні і змінні перешкод знаходяться в u і z відповідно

$$x' = f(x, u, z),$$

$$y' = f(x, u, z).$$

Деякі змінні стану залежать від інших, як представлені в рівнянні

$$x_1 = a \frac{dx_2}{dt} + \Delta,$$

де Δ – додатковий коефіцієнт.

При цьому, для будь-якої точки планера, вираженої в земній нерухомій системі координат, ми можемо записати наступні рівняння. Для скорочення записи приймемо c за \cos , s за \sin

$$\begin{cases} r_x = (c\psi c\theta)x + (c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi)y + (c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi)z \\ r_y = (s\psi c\theta)x + (s\psi s\theta s\varphi - c\psi c\varphi)y + (s\psi s\theta c\varphi + c\psi s\varphi)z \\ r_z = (-s\theta)x + (c\theta s\varphi)y + (c\theta c\varphi)z \end{cases}.$$

Кут крену φ – це кут між поперечною віссю X і віссю Z нормальної системи координат, зміщеною в положенні, при якому кут нишпорення дорівнює нулю. Кут крену позитивний, якщо зміщена вісь Z поєднується з поперечною віссю поворотом навколо поздовжньої осі по годинниковій стрілці, якщо дивитися в напрямку цієї осі.

Кут тангажу θ – це кут між поздовжньою віссю Y і горизонтальною площиною нормальної системи координат. Його слід вважати позитивним, якщо поздовжня вісь перебуває вище горизонтальній площині.

Кут нишпорення ψ це кут між віссю X нормальної системи координат і проекцією поздовжньої осі на горизонтальну площину нормальної системи координат. Кут нишпорення позитивний, якщо вісь X поєднується з проекцією поздовжньої осі на горизонтальну площину поворотом навколо осі за годинниковою стрілкою, якщо дивитися в напрямку цієї осі

На рисунку 1.2 зображена структура математичної моделі БПЛА.

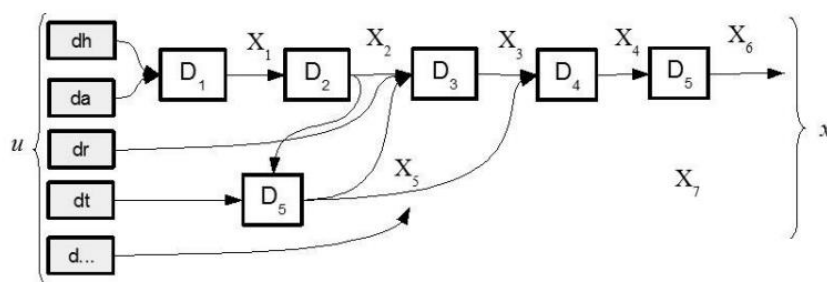


Рис. 1.2. Структура математичної моделі БПЛА.

Позначення на рис. 1.2: D_i – рушійні сили, $x = \{X_i\}$ – стани (X_1 – ступінь нахилу та рискання, X_2 – крок і кут нахилу, X_3 – швидкість відхилення та висота, X_4 – напрямок, X_5 – швидкість, X_6 – положення, X_7 – змінні стану, пов'язані з місією).

Спочатку необхідно надати кінематичну аналіз зв'язку між силою та крутним моментом, типом рами та конфігурація двигунів.

Конфігурація мультикоптера складається з довільної кількості двигунів (ON). Кожен двигун генерує аеродинамічну силу, яка складається з сили тяги і моменту опору.

Положення двигуна ξP_i визначається як

$$\xi_{Pi} = \begin{bmatrix} \sin \chi_i \\ -\cos \chi_i \\ 0 \end{bmatrix} \cdot l,$$

де χ_i – i -е положення двигуна щодо рами (рис. 1.3);

l – відстань від двигуна до центра мас.

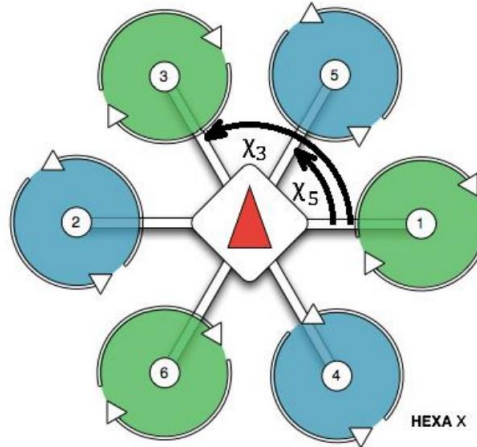


Рис. 1.3. Багатомоторне компонування

Орієнтація двигуна η_{Pi} визначається як

$$\eta_{Pi} = \mathbf{CR} \cdot \begin{bmatrix} \sin \chi_i \cdot \sin \gamma \\ -\cos \chi_i \cdot \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

Тут γ являє собою кут нахилу рушія. Якщо $\gamma = 0$, тоді ми маємо найпоширеніший «плоский» мультикоптер [12]. Різновиди мультикоптерів з точки зору розташування двигунів зображено на рис. 1.4.

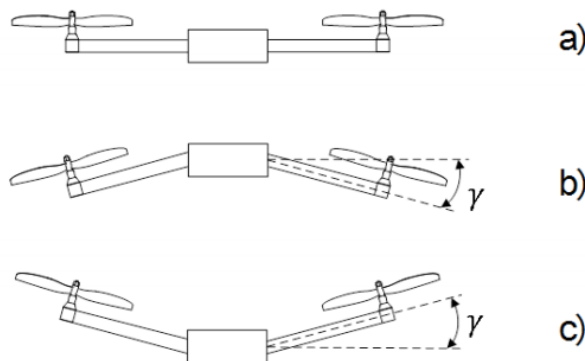


Рис 1.4. Різновиди мультикоптерів

Особливе місце системи передачі інформації займають в системах управління, в яких необхідно забезпечувати передачу досить великих потоків інформації з високою швидкістю, достовірністю та надійністю [4]. В процесі функціонування на телекомунікаційні мережі та її елементи впливають різні фактори, що порушують її нормальну роботу. Вони призводять до порушення роботи каналів та ліній зв'язку, фізичного виходу з ладу елементів мереж, інших негативних наслідків. Розглянемо принципи побудови систем передачі інформації по каналах з шумами та перешкодами.

На рис. 1.5. наведена узагальнена схема системи передачі інформації в телекомунікаційній мережі. Приймавши повідомлення від джерела повідомлень, КОДЕР генерує та видає на модулятор вхідну двійкову послідовність з визначеною довжиною. Сам модулятор перетворює кожен такий символ на один з двох сигналів, що подаються на вхід каналу. Демодулятор, підключений до виходу каналу, видає необхідний сигнал. Детектор же обробляє сигнал та видає елемент інформації, який у двійковому випадку являє собою дійсний скаляр. Декодер перетворює послідовність у розв'язок, що вказує, яке із усієї сукупності кодових слів було передано. Під каналом передачі у даному випадку мається на увазі середовище, за допомогою якого здійснюється передача сигналів від передавача до приймача.

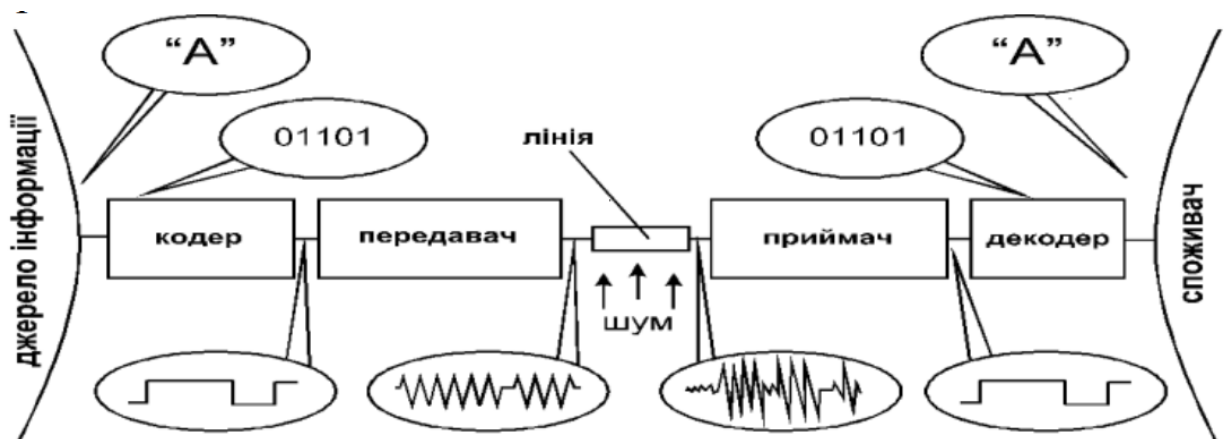


Рис. 1.5. Узагальнена система передачі інформації в мережах

В системі КОДЕР – це пристрій, який, приймаючи одне з повідомлень від джерела повідомлень, створює відповідну послідовність сигналів, що подається на вхід каналу передачі телекомунікаційної мережі. Джерело повідомлень генерує

безперервний потік двійкових символів, при цьому кожен із двійкових символів перетворюється КОДЕРОМ у кодове слово. Декодер – це пристрій, який, приймаючи вихідну послідовність визначеної довжини, обробляє її та видає результат оброблення споживачу повідомлень у зручному для нього вигляді [3].

Мета споживача полягає в тому, щоб дізнатися, яке з кодових слів було передано. Якщо на вхід КОДЕРА надійшли необхідна двійкових символів, то на виході декодера буде отримана сукупність із такого ж числа двійкових символів, яка називається рішенням. Якщо ж рішення не збігається з вхідним кодовим словом, то має місце помилка. Ймовірність помилки залежить від коду, каналу та методу оброблення інформації у самому декодері. Якщо застосовується детермінований декодер, то метод оброблення інформації може бути описаний як відображення безлічі усіх прийнятих послідовностей в множину кодових слів, а відображення задається як список множини послідовностей які перетворюються в декодоване слово.

Ступінь ризику передачі невірогідної інформації можна подати як добуток імовірності небажаних наслідків на відповідну величину втрат розраховуємо як

$$R = \sum_{i=1}^9 R_i = \sum_{i=1}^9 p_i \cdot Z_i,$$

де R – величина ризику;

p_i – ймовірності небажаних наслідків передачі невірогідної інформації;

Z_i – величини втрат інформації в каналі передачі.

У відносному вираженні ризик передачі невірогідної інформації оцінюють за допомогою коефіцієнта варіації δZ

$$\delta_Z = \sigma \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{\bar{Z}} \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \cdot (Z_i - \bar{Z})^2}.$$

Виходячи із величини коефіцієнта варіації δZ використовують таку шкалу [11] для оцінювання рівня ризику та відповідних зон ризику передачі невірогідної інформації у телекомунікаційній мережі:

- 0,0 – 0,1 мінімальний ризик;
- 0,1 – 0,25 малий ризик;
- 0,25 – 0,5 допустимий ризик;
- 0,5 – 0,75 критичний ризик;
- 0,75 – 1,0 катастрофічний ризик.

У реальних каналах передачі сигнали при передачі спотворюються, що приводить до відтворення повідомлення на приймальній стороні із деякою помилкою. Причиною таких спотворень можуть виступати як власні шуми приймально-передавальної апаратури, так і діючі на канал передачі зовнішні впливи як природного, так і штучного походження. У загальному випадку це веде до зниження ймовірності вірогідної передачі інформації та до зниження швидкості передачі в телекомунікаційній мережі. Причиною цього можуть так само бути спотворення, що вносяться каналом та випадкові зміни його параметрів.

Спотворення, які можуть бути внесені каналом передачі, можуть бути лінійними і нелінійними. Вони усуваються шляхом відповідної корекції характеристик каналу. На відміну від спотворень перешкоди носять випадковий характер. Вони заздалегідь невідомі і тому не можуть бути повністю усунені. На основі досліджень та аналізу каналів передачі даних, що застосовують технології видно, що у реальних каналах передачі інформації сигнали при передачі спотворюються, що приводить до відтворення повідомлення на приймальній стороні із деякою помилкою.

Причиною таких спотворень можуть виступати як власні шуми приймально-передавальної апаратури, так і діючі на канал передачі зовнішні впливи як природного, так і штучного походження. У загальному випадку це веде до зниження ймовірності вірогідної передачі інформації та до зниження швидкості передачі в телекомунікаційній мережі [22]. Таким чином, можна зробити висновок про те, що знання особливостей та принципів побудови каналів передачі телекомунікаційною мережею в умовах дії перешкод, дозволить будувати надійні канали передачі інформації для таких мереж.

1.2. Безпілотні авіаційні системи

Необхідно розрізняти поняття безпіотної авіаційної системи (БАС) і безпілотного авіаційного комплексу (БАК) [26].

Різниця між ними полягає в тому, що БАС є більш широким поняттям. БАК – це тільки сукупність матеріально-технічних засобів, необхідних для виконання певних функцій. БАК включає один або кілька безпілотних літальних апаратів, базову станцію що управляє, транспортне обладнання, технічні пристрої, що формують канали зв'язку і передачі інформації, пристрої обробки інформації та інше.

Безпілотна авіаційна система (БАС) включає в себе не тільки авіаційний комплекс, але і додаткові компоненти, що формують зв'язки різного виду між його елементами. Перш за все це технічний персонал і необхідне програмне забезпечення (ПО). Ще один важливий елемент БАС – можливість інтеграції з іншими системами, що дозволяють об'єднувати кілька БАК в систему з єдиним управлінням. Також в систему слід включити сукупність необхідної технічної і регламентної документації.

Як правило, БАК поставляється з підприємства-виготовлювача замовнику у вигляді закінченого комплексу, повністю готового до застосування [35]. Але при необхідності цей комплекс може розширюватися і інтегруватися в інші системи за рахунок додаткових апаратних і програмних засобів. Наприклад, до складу поставляемого тактичного ВАК можуть входити [28]: БПЛА, спеціальний тягач з встановленою на ньому стартовою катапультною, мобільний командний пункт, що має виносні антенно-фідерні пристрої, включаючи ретранслятори сигналів. Але цей комплекс може використовувати елементи що не входять нього: супутникову систему глобального позиціонування, допоміжний транспорт для перевезення людей і матеріальних ресурсів, ангари для зберігання техніки, інфраструктуру аеродромів включаючи радіолокаційні засоби і т.д. (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Узагальнена структура БАС

БПЛА, що входять до складу БАС і оснащені відповідної цільової навантаженням, визначають її спеціалізацію. Серед цивільних систем найбільш поширені [6] інформаційні, що отримують в польоті відео і фото дані, і передають їх на наземне обладнання для обробки. Для цього необхідно спеціалізоване ПЗ, що реалізує відповідні алгоритми.

Стартові і посадочні засоби можуть включати до свого складу транспортні машини, пускові установки, а також апаратуру та обладнання для перед- і після польотного контролю БПЛА. Ця частина комплексу обслуговується технічними розрахунками, що входять до складу персоналу БАС.

Пункти управління (рис. 1.7), що об'єднують в собі апаратуру та обладнання для розробки програм польотів БПЛА, польотного контролю їх технічного стану, радіокомандного управління виконанням польотних завдань, а також для збору,

обробки і передачі інформації, функціонують за допомогою розрахунків управління, що включають в себе командира розрахунку і операторів відповідних спеціалізацій.

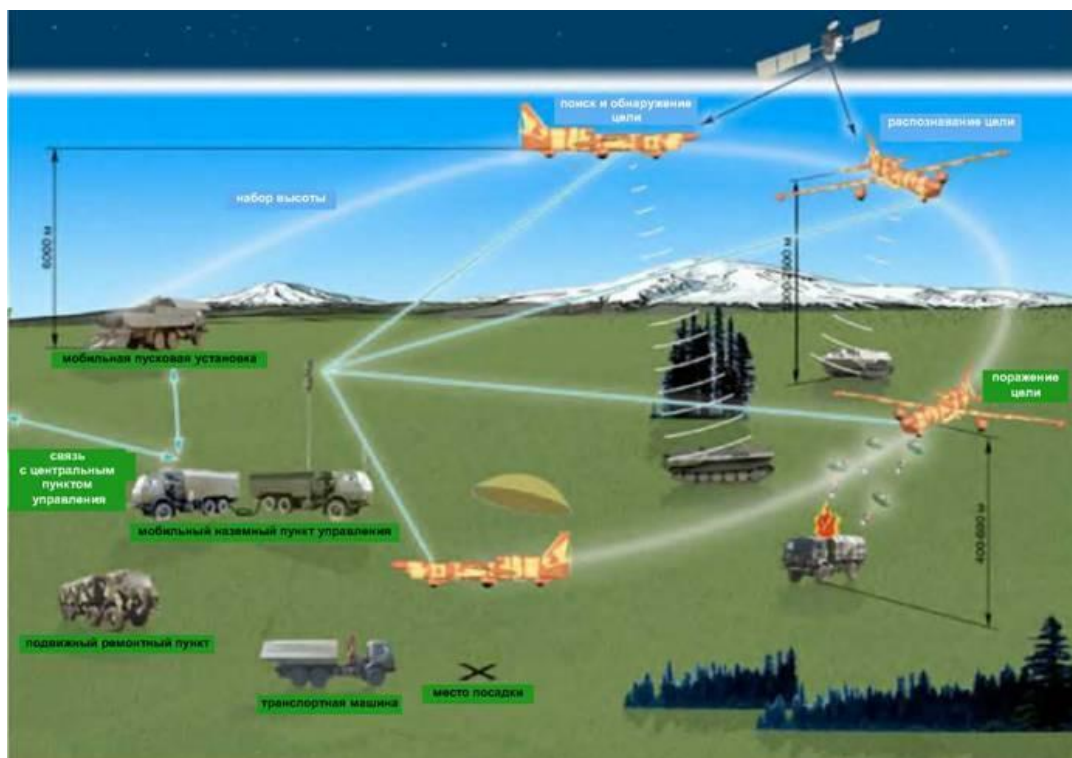


Рис. 1.7. Взаємодія різних елементів БАС

Пункти управління в залежності від масштабу покладених на систему завдань розрізняються по організації і виконанню. Так, для управління БПЛА стратегічного і тактичного призначення найчастіше застосовують стаціонарні пункти управління (рис. 1.8).

Стаціонарні пункти управління не зважаючи на свою не мобільність все ж таки мають певні переваги. До них відносяться такі параметри як дальність зв'язку, автономність, кількість обладнання.

Для управління БПЛА оперативного призначення доцільно розміщувати пункти управління на мобільних платформах [1] – на автомобілях або кораблях, а для управління легкими апаратами невеликого радіусу дії взагалі найчастіше використовують переносні портативні комплекти, що швидко розгортаються і збираються в польових умовах.



Рис. 1.8. Приклад організації робочих місць операторів на стаціонарних пунктах управління БАС

Дуже важливе питання перехоплення сигналів керування БПЛА. Значна частина систем протидії БПЛА малого класу (дрони, мультикоптери) використовує пасивні (радіо-радіотехнічні) методи виявлення сигналів, випромінюваних БАС і самим літальним апаратом, і активні (радіо-радіотехнічні) методи впливу на приймальне обладнання літального апарату або БАС [2].

Сигнали БАС можуть бути об'єктом виявлення (ідентифікації, пеленгування), а приймальне обладнання, розміщене на борту ЛА може бути об'єктом блокування (придушення).

Знання специфіки, структури і особливостей типових протоколів (режимів), використовуваних в каналах управління ЛА, може значно полегшити вирішення завдань, пов'язаних з розробкою рішень і технологій протидії протиправному використанню літальних апаратів малого класу [15].

Для каналів управління сучасних БПЛА малого класу (вертолітного типу, цивільного, призначеного для користувача призначення) найбільш характерним, є застосування завадостійких режимів так званого «швидкої псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ)».

В даний час більше 80% [29] цивільних «дронів» випускаються іноземними виробниками, використовують режими ППРЧ в каналах управління (НПУ-БПЛА).

Режими ППРЧ, спочатку [20] розроблялися для застосування в області військової радіозв'язку, їх застосування в цілях управління цивільними «дронами», обумовлено специфікою застосування цих виробів.

Для більшості користувачів, «дрон» є досить недешевою «іграшкою» (атрибутом популярного хобі) призначеної для використання, в тому числі в міських умовах, в діапазонах частот, «перевантажених» сигналами іншого радіо обладнання.

Використання менш перешкодостійких режимів, в складних умовах міста, загрожує підвищенням ризиком аварії, падіння, пошкодження або втрати літального апарату (що в свою чергу може спричинити негативні наслідки і для виробника «дронів»).

Реалізована іноземними [3] виробниками стійкість (каналу управління), більшості «дронів», по ряду критеріїв не поступається аналогічним критеріям сучасних перешкодозахисних систем, що застосовуються у військовій радіозв'язку.

Незважаючи на значну різноманітність типів, моделей і виробників «дронів» (використовують ППРЧ, в каналах управління), можна виділити узагальнені параметри і характеристики, типові для виробів більшості іноземних виробників [13]:

- максимальна «легальна» потужність випромінюваного сигналу (в каналі управління) – 100 мВт;

- типові (пріоритетні) діапазони частот – 2.4 і 5.8 ГГц;

- швидкодію режиму ППРЧ (типово) – від 350-500 ск/сек (макс. 2900 ск/сек);

- вид модуляції (типово) – *FSK2* (рідше – *PSK2* (A / B) і *OFDM*);

- тривалість імпульсу (типово) – 500 мкс – 2.5 мс;

- ширина імпульсу (типово) – 300 кГц – 2 МГц;

- символна швидкість передачі даних (типово) – 1000 – 2000 кбод;

- смуга «сітки ППРЧ» – близько 80 МГц;

- кількість каналів «сітки ППРЧ» – до 40.

Для каналу управління даного БПЛА (ППРЧ) характерно:

- діапазон – 2.4 ГГц;

- 40-канальна «сітка ППРЧ» в смузі 80 МГц;

- швидкодія ППРЧ – 350 ск / сек

- ширина одиночного імпульсу – близько 1.1 МГц;
- між імпульсний інтервал – близько 0.8 МГц.

З спектрограми (рис. 1.9) видно, що в одну одиницю часу активний (використовується для передачі даних), тільки один з 40 каналів сітки ППРЧ, тривалість одного сеансу передачі даних (для даного виробу) складає близько 2-х мс на одному каналі.

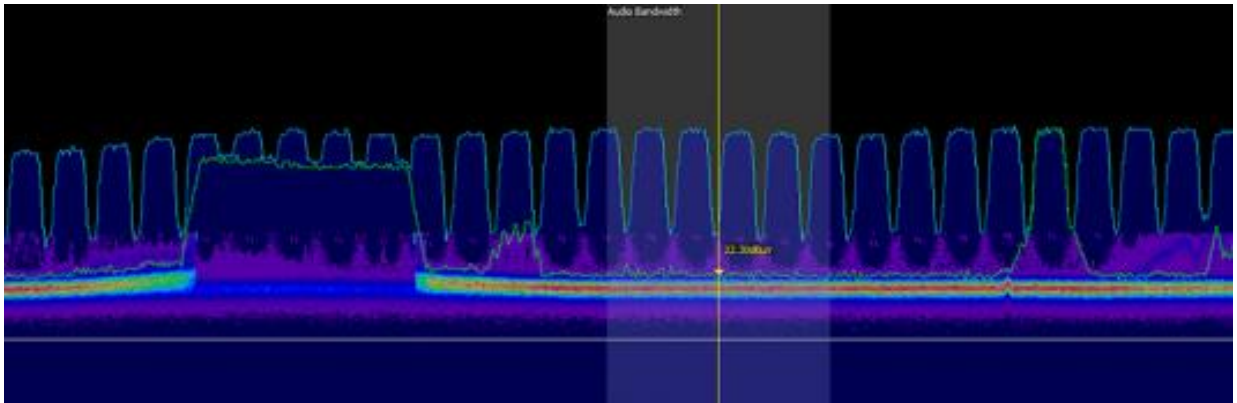


Рис. 1.9. Поліхромна діаграма спектра (отримана в режимі накопичення даних) для каналу управління ППРЧ типового БПЛА

З спектрограми, знятої в умовах реальної роботи, видно, що в смузі сітки ППРЧ (каналу управління) присутні сигнали інших радіо приборів (в тому числі сигналів *Wi-Fi*, сигналів каналу передачі відеоданих самого БПЛА і т.д.).

Практичним шляхом встановлено, що для даного виробу характерна висока ступінь завадостійкості – критичні порушення функції управління БПЛА настають тільки в разі придушення практично 100% каналів «сітки ППРЧ». У разі не придушення навіть 1-2 каналів, у оператора БПЛА зберігається можливість здійснювати збалансоване управління літальним апаратом.

Специфіка і особливості каналів управління сучасними БПЛА (режим ППРЧ) диктують основні вимоги до систем протидії, які реалізують пасивні (радіо-радіотехнічні) методи виявлення сигналів НПУ (каналу управління).

До основних вимог системи протидії, яка виконує функції виявлення сигналів каналу управління БПЛА (ППРЧ) можна віднести:

- СВЧ діапазон робочих частот (як мінімум 2.4 і 5.8 ГГц, з урахуванням можливого використання в обладнанні БПЛА інших діапазонів);

- можливість виявлення сигналів особливо малої потужності (тип. 100 мВт) підвищені вимоги до параметру «чутливість» системи виявлення;
- можливість виявлення сигналів в складних умовах міської забудови і наявності великої кількості сигналів, що заважають, підвищені вимоги до параметру «вибірковість» системи виявлення;
- можливість виявлення короткочасних, імпульсних сигналів «швидкого ППРЧ», підвищені вимоги до параметру «швидкодія» системи виявлення;
- можливість виявлення короткочасних, імпульсних сигналів «швидкого ППРЧ», розподілених в широкій (не менше 80 МГц) смузі, підвищені вимоги до параметру «одночасна смуга аналізу» системи виявлення і т.д.

Для отримувального, контрольного і вимірювального радіо обладнання початкового або середнього класу, виявлення самого факту роботи «швидкого ППРЧ» є вкрай складним завданням.

Також самі БПЛА можуть бути використані у якості базової станції. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як літаючих базових станцій (БС) приваблює зростання інтерес за останні кілька років. БПЛА можуть бути розгорнуті для доповнення існуючої стільникової мережі системи, надаючи надійні бездротові послуги для наземних користувачів, щоб потенційно збільшити пропускну спроможність мережі, усунути діри покриття та впоратися зі стрімким сплеском зв'язку потреби під час подій. Порівняно з наземними БС, які розгортаються фіксовано довгостроково розташовані, БПЛА більше підходять для тимчасового обслуговування на вимогу. Наприклад, БПЛА можуть надавати послуги зв'язку для великих подій (наприклад, спортивних чи музичних) під час якого пропускну здатність наземної мережі часто не витримує. Крім того, локацію БПЛА можна регулювати.

Таким чином, вони встановлюють свої позиції та встановлюють зв'язок прямої видимості із наземними користувачами для підвищення продуктивності мережі. Через їх широкий діапазон прикладних програм і низьку вартість, БПЛА є перспективним рішенням для забезпечення тимчасового зв'язку для наземних користувачів. Однак розгортання БПЛА для стільникових послуг на вимогу

стикається з кількома ключовими проблемами. Наприклад, БПЛА суворо обмежені енергією на борту, яку слід ефективно використовувати для спілкування. Однак розгортання на вимогу вимагає постійних змін позиції БПЛА для задоволення запитів миттєвого спілкування. Тому більша частина бортової енергії може споживатися двигунами, обмежуючи тим самим їхні можливості з комунікації.

Більше того, щоб ефективно полегшити перевантаження мережі під час події точки доступу, розгорнутий БПЛА повинен мати достатньо бортового живлення, щоб задовольнити попит на зв'язок низхідної лінії зв'язку. Виділивши кваліфікований БПЛА з достатньою енергією, оператор мережі повинен оцінити необхідну передачу потужність, виходячи з навантаження на транспорт в реальному часі. Ці виклики, у свою чергу, мотивують потребу у всебічному прогнозуванні стільникового трафіку та прогнозуючий підхід до розгортання БПЛА. З цією метою для оцінки стільникового трафіку можуть бути застосовані методи машинного навчання. Враховуючи передбачуване навантаження на транспорт, кожна БС може виявити точку доступу райони та попросить відповідні БПЛА, щоб полегшити перевантаження мережі.

Ще однією проблемою розгортання антенних бездротових послуг на вимогу є стимулювання співпраці між наземними операторами БС та БПЛА за асиметричною інформацією. Наземні БС та БПЛА можуть належати різним операторам, які прагнуть егоїстично максимізувати свої індивідуальні переваги. Отже, щоб попросити допомоги БЛА, наземний БС повинен запропонувати відповідну економічна винагорода оператору БПЛА за бездротову послугу з повітря.

Висновки за розділом

На даний час БПЛА пройшли великий путь розвитку довжиною більш ніж у 20 років. За цей час було розроблено велику кількість різних підходів до розробки програмного та апаратного забезпечення. Пріоритетом розробки завжди є швидкодія, надійність, легкість, масштабованість.

На даний час взірцем програмної архітектури БПЛА є модульна архітектура з'єднання обчислювальних блоків. Вона дозволяє гарантувати легку інтеграцію нових блоків у систему, полегшити написання програмного забезпечення. Окрім цього модульна архітектура дозволяє динамічно розподілювати потоки з даними що підвищує надійність системи в цілому, так як робить можливим дублювання обчислювальних блоків.

Архітектура з головним обчислювальним комп'ютером та блоком контролю місій надає можливість швидко змінювати програмне забезпечення та цільове призначення БПЛА у «польових» умовах. Це стає можлива завдяки модульній архітектурі, до якої нові обчислювальні блоки можна під'єднувати навіть під час роботи системи, та завдяки швидкій зміні програмного забезпечення у блоці контролю місій.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД БОРТОВИХ СИСТЕМ ТА ЗАСОБІВ ПЕРЕДАЧІ МІЖ БЛОКАМИ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

2.1. Огляд бортових інформаційних систем

Бортове обладнання – сукупність технічних засобів (агрегатів, приладів, машин і т.п.), що встановлюються на борту ЛА. В авіації прийнято розділяти приладове обладнання на датчики, індикатори, прилади і сигналізатори [8].

Датчик – вимірювальний пристрій для вироблення сигналу про поточне значенні вимірюваного параметра.

Індикатор – засіб відображення інформації про кількісне або якісне значення параметра.

Прилад – пристрій, що має самостійне експлуатаційне значення і забезпечує вимір і індикацію параметра / параметрів.

Сигналізатор – прилад, що забезпечує відображення інформації про відповідність або невідповідність параметра, системи або об'єкта необхідним значенням або станом у вигляді візуальних, звукових або тактильних сигналів.

Структурно апаратура, машини і агрегати на борту ЛА об'єднуються в системи, призначені для вирішення окремих завдань. Навіть на невеликому ЛА їх десятки. Окремі системи можуть об'єднуватися в більш великі структурні утворення – комплекси. Комплекс бортового обладнання – сукупність функціонально-пов'язаних систем, приладів, датчиків, обчислювальних пристроїв. Приклади комплексів: пілотажно-навігаційний, оглядово-прицільний, розвідки.

Все радіоелектронне обладнання ЛА, незалежно від приналежності до тієї чи іншої з перерахованих груп, часто називають авіонікой. Бортіві інформаційні системи також належать до цієї групи устаткування. Склад авіоніки різний для різних класів ЛА. Розглянемо його на прикладі пасажирських магістральних літаків, таких,

як Tu-204, Airbus A-320, Boeing 757, де авіоніка представлена найбільш широко [14].

її можна розділити на наступні групи:

- системи первинної інформації;
- радіонавігаційні системи;
- радіозв'язкові системи;
- системи автоматичного пілотування;
- бортові інформаційні системи;
- інші пілотажно-навігаційні системи.

2.1.1. Системи первинної інформації

Завданням систем первинної інформації є вимір різних сигналів і параметрів, що характеризують політ і стан літака. Кожна з таких систем спеціалізується на вимірюванні сигналів певної фізичної форми і певного призначення. До складу системи входить від 1 до 3 однакових обчислювачів, кожен з яких здатний вирішувати всі завдання. За рахунок такого резервування забезпечується висока надійність. Обчислювач є електронний блок, що містить всередині всі необхідні вимірювальні пристрої, процесор, пам'ять і засоби вводу-виводу. Вимірювана інформація піддається в обчислювачі певної обробці – фільтрації, масштабування, лінеаризації, калібрування, потім за величиною сигналу розраховується значення відповідної фізичної величини – швидкості польоту, температури повітря і т.п. розраховане значення видається з обчислювача всім зацікавленим в ній споживачам, серед яких системи автоматичного пілотування, системи індикації та сигналізації.

Інерціальна навігаційна система (ІНС) служить для вимірювання кутового положення ЛА в просторі і визначення його місця розташування. Вона вимірює кути курсу, крену, тангажу, кутові швидкості зміни крену і тангажу, лінійні прискорення (перевантаження), вона також обчислює кут нахилу траєкторії, істинний курс, шляхову швидкість, вертикальну швидкість, кут знесення, параметри вітру, географічні координати ЛА – широту і довготу. Зазвичай система складається з 3 блоків. Кожен містить 3 датчика кутових положень, наприклад, лазерні гіроскопи, 3

акселерометра для вимірювання прискорень по трьох осях і електронну частину. Іноді замість ІНС на для тієї ж мети використовують більш просту по конструкції систему – курсовертикаль. Курсовертикаль здатна виміряти тільки поточні кути положення ЛА – курс, крен і тангажу. Новітні вдосконалені ІНС мають більш високу точність за рахунок сполучення з супутниковою навігаційною системою, дані якої використовуються для корекції гіроскопів.

Система перетворення інформації (СПІ) вимірює параметри різних авіаційних систем – гідравлічної, паливної, кондиціонування, електропостачання та інших. Датчики впливають фізичні параметри – тиск, температура, переміщення, а вихідні сигнали датчиків, що надходять в СПІ, мають електричну природу. За виміряним електричним сигналам система обчислює чинне на датчик значення параметра. До складу системи зазвичай входить 2 однакових обчислювача [27]. Частина маловідповідальних сигналів розподіляється між ними, інші приймаються обома одночасно – цим досягається висока надійність вимірювання цих сигналів.

Система вимірювання параметрів двигуна (СВПД) подібна системі СПІ, вона також вимірює електричні сигнали різних датчиків, тільки спеціалізується на вимірюванні параметрів двигуна.

2.1.2. Радіонавігаційні системи

Радіонавігаційні системи визначають місце розташування ЛА, використовуючи для цієї мети радіотехнічні засоби. Ці системи можуть бути автономними, що працюють на радіолокаційному принципі, і неавтономними, що використовують сигнали від радіомаяків. Наземні радіомаяки служать для водіння ЛА по маршруту польоту і для приводу на аеродром. Їх встановлюють на поверхні землі в поворотних пунктах маршрутів і в зоні аеродрому. Сигнал, що випромінюється або ретранслюється радіомаяків, пеленг бортовим приймачем.

Вимірюючи параметри сигналу, приймач визначає напрямок на маяк, дальність до нього або величину відхилення від заданого напрямку. радіомаяки зазвичай використовуються для забезпечення польоту ЛА на маяк або від маяка. Однак по двом

рознесенням маяків можна визначити і поточне місце розташування літака. Розташовані в різних точках радіомаяки працюють на різних частотах, що дозволяє налаштовувати радіонавігаційну систему на конкретний маяк. Крім того, радіомаяки, як правило, передають азбукою Морзе сигнали впізнання.

Випускаються спеціальні радіонавігаційні карти, на яких все радіомаяки прив'язані до координат земної поверхні і для кожного з них вказані його частота і позивні. Прокладаючи маршрут, штурман (або пілот) так будує траєкторію польоту, щоб вона, якщо можливо, проходила над радіомаяками. Що виходить внаслідок лінія заданого шляху є ламаною лінією, в точках перегину якої знаходяться радіомаяки. Політ розбивається на відрізки і задача пілотування зводиться до витримування напрямку на черговий радіомаяк. Для цього на початку кожного відрізка екіпаж налаштовує радіонавігаційну систему на обраний радіомаяк за допомогою пульта управління. Пульти управління у кожній з радіонавігаційних систем можуть бути свої власні, проте на сучасних ЛА частіше використовується єдиний багатофункціональний пульт управління (МФПУ), за допомогою якого можна налаштувати все радіонавігаційні і радіозв'язкові кошти на борту ЛА.

На більшості ЛА [25] перед кожним пілотом встановлено комплексний пульт радіотехнічних засобів, на ньому розташовані кнопки вибору настроюються радіозасобів, ручки для налаштування і цифрові індикатори. Введена частота настройки передається з МФПУ відповідної радіонавігаційної системи. У режимі автоматичного управління настройку на черговий радіомаяк здійснює автоматика: обчислювальна система літаководіння ініціює передачу відповідної частоти настройки потрібному комп'ютері.

Автоматичний радіокомпас (АРК) служить для навігації по приводним і ширококомовним радіостанціям. Це найпростіший вид радіомаяка. Радіостанція безперервно випромінює незгасаючі або тонально модульовані коливання і свої позивні. Частотний діапазон роботи радіостанцій 190-1750 кГц розбитий на канали з інтервалом в 50 кГц. на ЛА встановлюють два комплекти АРК, кожен містить дві антени, спрямовану (рамкову) і ненаправлену, і приймач. Принцип дії АРК заснований на порівнянні амплітуд і фаз сигналів, що надходять з спрямованої і

ненаправленої антен. Радіокомпас визначає напрямок на приводну радіостанцію – її курсової кут. Похибка не перевищує 3-5. Дальність дії залежить від висоти польоту і потужності радіостанції, при потужності 500Вт дальність складає 200-300 км .

Далекомір *DME* (від англійського «*Distance Measure Equipment*» – апаратура вимірювання дальності) служить для точного визначення похилій дальності до радіомаяка. Це обладнання встановлюють зазвичай у доповнення до радіомаяка *VOR* там, де напружений повітряний рух вимагає більш високої точності навігації, ніж та, яка забезпечується за допомогою маяків *VOR*. До складу комплексу входить блок запитувача і щілинна антена. На літаку може встановлюватися два комплекти – для надійності й для можливості настройки на два різних радіомаяка *DME*, що дозволяє визначити точне місце розташування ЛА.

Система попередження зіткнень визначає положення інших ЛА щодо даного. Мета такої системи – уникнути зіткнень. Це можливо тільки щодо тих ЛА, які мають на борту таку ж систему. Тому США і Європа зробили наявність на борту системи СПЗ обов'язковою умовою для виконання польотів в їх повітряному просторі [30]. До складу системи входить обчислювач і дві антени, а при відсутності на борту системи індикації – ще і окремий індикатор. Антени розташовують в носовій частині літака, але по різні боки фюзеляжу – щоб уникнути взаємних перешкод. Одна антена всенаправлена і розташована під фюзеляжем. Друга антена, що служить для точного визначення напрямку на інший літак, спрямована, вона розташована над фюзеляжем.

2.1.3. Системи автоматичного пілотування

Системи автоматичного пілотування керують польотом літака. Це 4 самостійних системи:

- автоматична система підвищення стійкості і керованості;
- обчислювальна система управління польотом;
- обчислювальна система літаководіння;
- обчислювальна система управління тягою.

Типова схема взаємодії систем автоматичного пілотування зображена на рис.2.1.

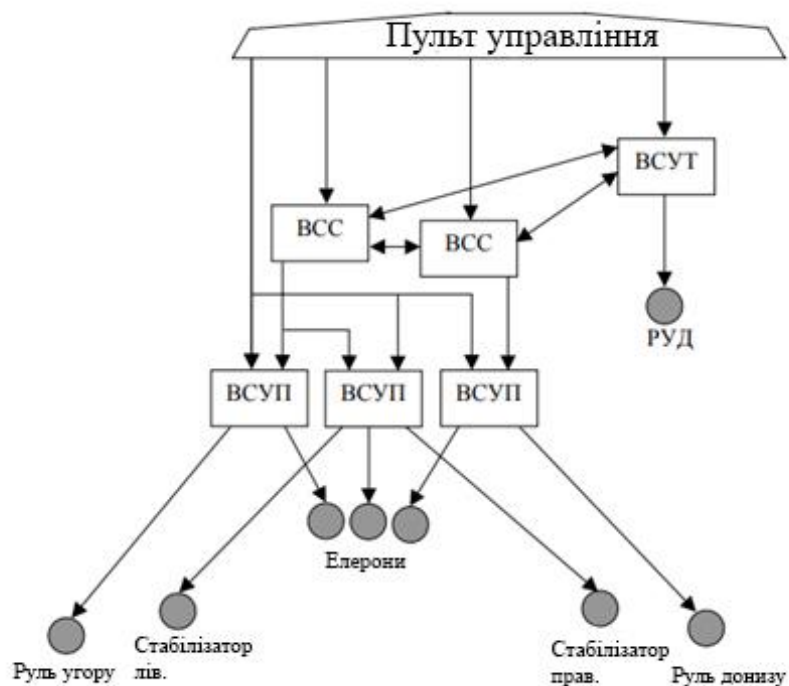


Рис. 2.1. Системи автоматичного пілотування

Позначення на рис. 2.1: ВСС – обчислювач системи літаководіння, ВСУП – обчислювач системи управління польотом, ВСУТ – обчислювач системи управління тягою, руд – ручка управління двигуном.

Автоматична система підвищення стійкості і керованості призначена для забезпечення необхідних характеристик керованості літака в ручному режимі, тобто коли автопілот відключений. Склад, структура і характеристики АСУУ сильно залежать від конкретного типу ЛА [16]. У зв'язку з високими вимогами по надійності система має кілька незалежних каналів. Наприклад, система АСШУ-204 літака ТУ-204 містить основний і резервний контури. основний контур складається з трикратно резервованих цифрових блоків, резервний контур забезпечує формування керуючих сигналів за допомогою аналогових обчислювачів.

Літак здатний літати з одного тільки АСУУ [17] – без трьох інших систем, які, навпаки, використовуються не в ручному, а в інших режимах управління. Крім ручного управління бувають ще автоматичний, поєднаний і директорной режими управління. Автоматичне управління забезпечує управління ЛА без участі пілота. Показники штурвала по крену і тангажу і пропорційно їм формуються керуючі сигнали для досягнення необхідного кутового положення. У режимі директорной

управління роль систем автоматичного управління пасивна: тільки видача сигналів управління по крену, тангажу і помилки по швидкості на пілотажний індикатор. А безпосереднє пілотування здійснює пілот, користуючись при цьому підказками систем автоматичного пілотування на пілотажний індикаторі. Крім того може бути режим стабілізації будь-якого параметра – висоти, швидкості, числа M , і т.д. У режимі стабілізації системи автоматичного пілотування забезпечують витримування того значення параметра, яке було досягнуто в момент включення режиму.

Обчислювальна система управління польотом виконує основні автопілотні функції і управляє автоматичної посадкою літака. Незалежно від включеного режиму всупу запобігає вихід літака за допустимі межі по швидкості, тобто політ зі швидкістю менше мінімально-допустимої і більше максимально допустимої швидкості.

Для вирішення завдань управління система приймає інформацію від систем первинної інформації, радіонавігаційних систем, літака (положення закрилків, керма напрямку, елеронів, керма висоти, шасі) і інших систем автоматичного пілотування. Вихідні сигнали надходять на кермо висоти, елерони і кермо напрямку. Для управління використовуються сигнали зворотного зв'язку про становище як сервоприводів, так і самих керуючих поверхонь.

2.2. Критичні модулі забезпечення діяльності БПЛА

В основному БПЛА автоматично управляється вбудованим комп'ютером [3]. Це система, яка читає інформація з широкого спектру датчиків (акселерометри, гіроскопи, *GPS*, датчики тиску) та керує місією БПЛА заздалегідь визначеним план польоту.

Все більшу і більшу популярність набувають БПЛА побудовані на модульній архітектурі. Принцип модульності дозволяє розробити багатофункціональний пристрій, що може бути легко зконфігурований під певні специфічні задачі. Система БПЛА зазвичай складається з самого БПЛА, наземної станції та декількох допоміжних модулів на борту, наприклад, камери огляду від першої особи. У багатьох

випадках БПЛА використовується як несуча платформа і не має з'єднання з допоміжними модулями. Елементи керування БПЛА та пристроями також часто розділені.

Модульна архітектура передбачає наявність основних та допоміжних модулів (рис. 2.2).

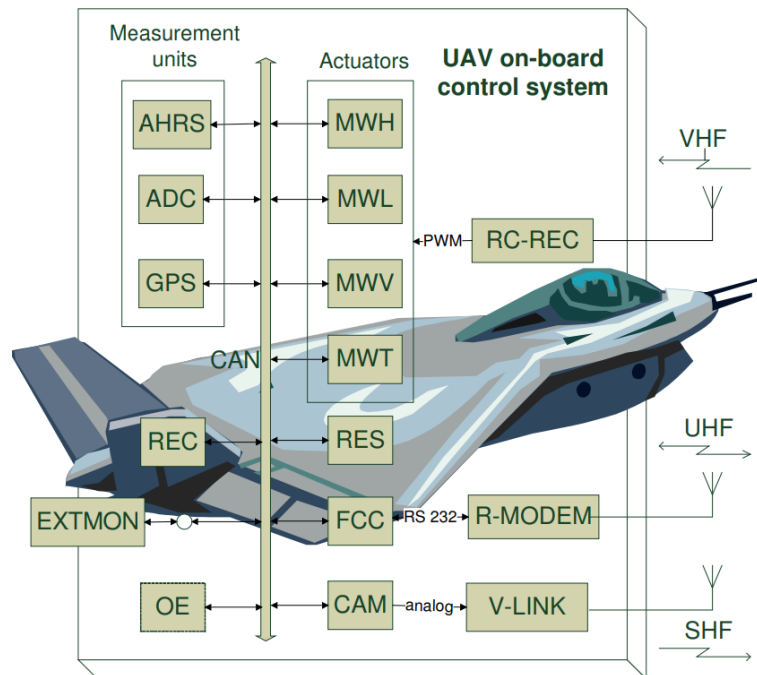


Рис. 2.2. Схема взаємодії базових модулів БПЛА

Тож визначимо та оглянемо основні модулі БПЛА без яких не можливе його використання:

- модуль керування двигунами;
- обчислювальний модуль;
- модуль керування польотом;
- модуль навігації;
- модуль зв'язку.

Двигуни постійного струму для керування моторами у безпілотних літальних апаратах, як правило, мають щітковий або безщітковий тип (*BLDC*). Менші машини можуть використовувати щіткові двигуни для зменшення ваги та простоти, тоді як більша надійність та зменшений електромагнітний шум є переконливими причинами для використання безщіткових моторів у великих БПЛА. Щоб спростити розробку

модулів керування двигуном доступні різноманітні набори від виробників мікрочипів [2]. Алгоритми управління, такі як польово-орієнтоване управління (*FOC*) за допомогою датчиків Холла або вимірювання зворотної ЕРС для виявлення положення мотора зазвичай використовують для швидкого прототипування.

Однак навіть за допомогою готових рішень інженерам потрібен певний досвід у проектуванні двигунів для досягнення точного контролю швидкості та крутного моменту. Проблеми полягають у налаштуванні програмного забезпечення для обраного двигуна, а згодом і в тонкій настройці параметрів для оптимізації реакцій на команди швидкості та крутного моменту. Інженеру потрібно з'ясувати константу напруги двигуна (K_e), коефіцієнт тертя та момент інерції [3]. Якщо контролер покладається на вимірювання зворотної ЕРС, необхідно налаштувати безсенсорне спостереження за станом, а також регулювання швидкості. Нещодавно такі виробники, як *TI* та *STMicroelectronics*, успішно спростили настройку двигуна, що дозволило розробникам керувати двигуном без попереднього ознайомлення з його властивостями.

Обчислювальний модуль це модуль системи БПЛА, що відповідає за обробку та кодування/декодування сигналів що поступають з усіх інших модулів системи. Найбільш ефективним та популярним [23] на даний час є модуль *Texas Instruments ARM® Cortex®-A8 AM335x*. Звичайні ядра *ARM*, що, працюють разом із операційній системі, що не працює в режимі реального часу, наприклад *Debian Linux*, не можуть досягти стислих термінів, необхідних для точного управління БПЛА. *Texas Instruments ARM® Cortex®-A8 AM335x* має програмовані ядра реального часу (*PRU*) *TI AM335x SoC*. Кожен *PRU* має ядро *RISC* на частоті 200 МГц, призначене для обробки сигналів у реальному часі. Отже, такі задачі як управління двигунами та контроль положення карданного механізму за допомогою ШІМ-сигналів, можуть бути вивантажені з ядра *ARM* на *PRU*.

Незалежно від того, чи керується БПЛА автономно або наземними пілотами, *GPS* у БПЛА відіграє важливу роль. *GPS*-навігаційні методи можуть забезпечити стабільну точність якщо протягом усієї місії БПЛА може отримати доступ до достатньої кількості супутникових сигналів. Часто *GPS* використовується разом з

інерційними навігаційними системами (*INS*), щоб запропонувати більш комплексні навігаційні рішення [37].

Найпоширенішим використанням *GPS* у БПЛА є навігація. Відносно розташування та швидкість апарату також зазвичай визначаються за допомогою *GPS*.

Положення, надане приймачем, може використовуватися для відстеження БПЛА або, у поєднанні з автоматизованою системою наведення, керувати БПЛА. Автономний БПЛА зазвичай покладається на сигнал положення *GPS*, який у поєднанні з даними інерціальних вимірювальних одиниць (*IMU*) забезпечує дуже точну інформацію, яка може бути застосована для автопілотування. Щоб уникнути нещасних випадків у районі з великою заселеністю іншими БПЛА або пілотованими транспортними засобами, необхідно точно знати, де БПЛА знаходиться постійно. Оснащений *GPS*, БПЛА може не тільки надавати інформацію про місцезнаходження та висоту, але й необхідні рівні вертикального та горизонтального захисту [19].

Модуль керування польотом відповідає за реєстрацію нових та моніторинг поточних місій. На новий запит на виконання місії, оператор місії аналізує вхідний запит про місію, перевіряє запит після аналізу вимог місії від стану системи та модулів.

Оператор встановлює нову місію в чергу місій (рис. 2.3).

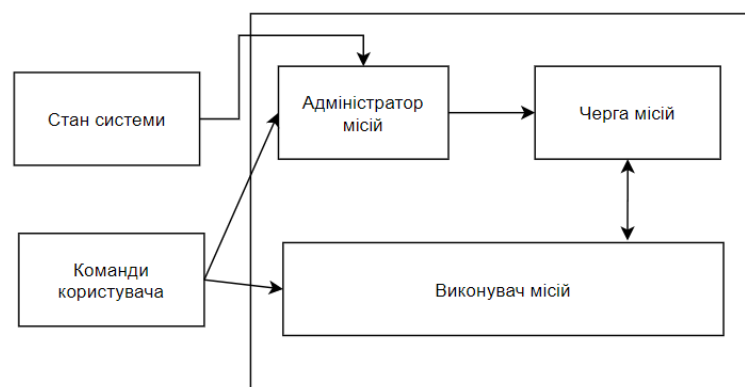


Рис. 2.3. Схема роботи модуля керування польотом

Виконавець місії веде облік місій у черзі. Кожна місія повинна звітувати про свій прогрес і стан перед місією виконавець періодично. Якщо з запуску не отримано

звіту місія або критерії місії недостатні, місія є негайно вилучено з черги місії під час генерації повідомлення про перерву місії. Місії також мають пріоритети. Ядро модуль має кілька вбудованих місій (наприклад, аварійний наземний) які мають вищий пріоритет, ніж розроблені місії. Автоматичний ініціювання такої місії змушує Виконавця місії поставити *a* нова місія до черги місій, що призвело до негайного виконання пріоритетної місії, тоді як поточна місія відкладається.

Наземна станція, як правило, є програмним додатком, що працює на наземному комп'ютері, який зв'язується з вашим БПЛА за допомогою бездротової телеметрії. Він відображає дані в реальному часі про продуктивність та положення БПЛА і може служити "віртуальною кабіною", показуючи багато тих самих приладів, які ви мали б, якби летіли на справжньому літаку. Станція також може використовуватися для управління БПЛА в польоті, завантаження нових команд місії та встановлення параметрів. Вона також часто використовується для моніторингу поточних відеопотоків з камер БПЛА [21].

Існує щонайменше десять [24] різних станцій наземного управління. Для ОС Windows такі як: *Mission Planner*, *APM Planner 2*, *MAVProxy*, *QGroundControl* і *UgCS*.

Для планшетів/смартфонів є *Tower (DroidPlanner 3)*, *MAVPilot*, *AndroPilot* і *SidePilot*.

Лінія передачі даних використовує радіочастотну (РЧ) передачу для передачі та отримання інформації на БПЛА та з неї. Ця інформація може включати місцезнаходження, залишковий час польоту, відстань і місце розташування до цілі, відстань до пілота, місцезнаходження пілота, інформацію про корисне навантаження, швидкість польоту, висоту та багато інших параметрів. Цей канал передачі даних також може передавати відео в реальному часі з БПЛА назад на станцію, щоб пілот і наземний екіпаж могли спостерігати за тим, що бачить камера БПЛА.

У системі передачі даних використовуються різні частоти. Частоти, які використовуються, базуються на торговій марці БПЛА, а також на функціональних можливостях БПЛА. Наприклад, системи *DJI* [6] використовують 2,4 ГГц для управління БПЛА та 5 ГГц для передачі відео. Це налаштування надасть користувачеві приблизно 6 кілометрів дальності. Однак, якщо використовувати 900

МГц для управління БПЛА та 1,3 ГГц для відео, можна досягти відстані 40+ кілометрів.

Підсумовуючи описані блоки необхідні для здійснення польоту БПЛА приведемо схему їх розташування та взаємодії (рис. 2.4.)

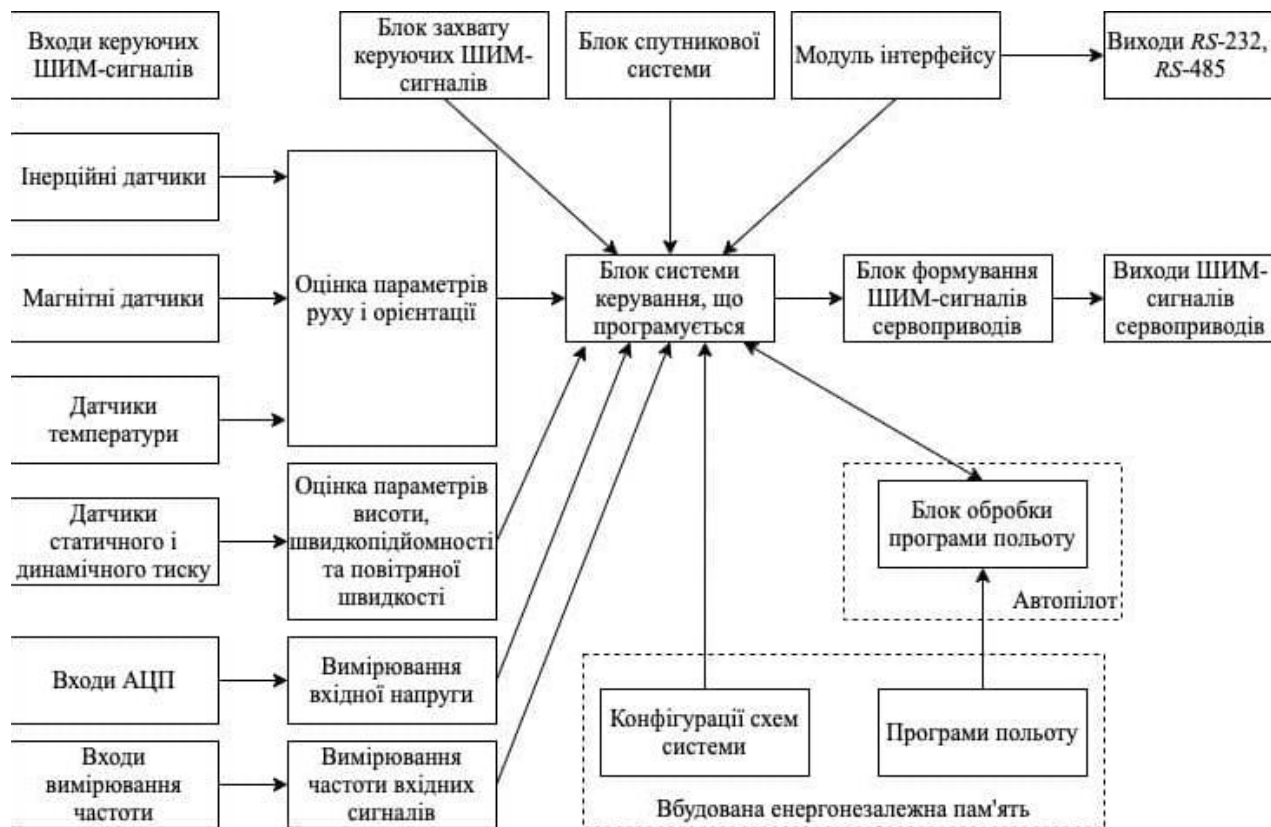


Рис. 2.4. Схема взаємодії блоків БПЛА

2.3. Спеціалізовані модулі для вирішення специфічних задач БПЛА

Ідея модульної архітектури полягає у збільшенні сумісності, гнучкості та розширюваності розробленої система та її індивідуальних компонентів. При реалізації будь-якої системи, ми хочемо мати можливість повторно використовувати компоненти існуючих систем, однак, як правило, ми запроваджуємо додаткові залежності між компонентами. Модульні архітектури намагаються мінімізувати ці залежності за допомогою вільного зв'язку компонентів. Вільний зв'язок між взаємодіючими компонентами забезпечується за допомогою двох архітектурних

обмежень. По-перше, невеликий набір простих та розвинених інтерфейсів для всіх учасників системи із лише загальною семантикою, закодованою в них.

По-друге, кожен інтерфейс може надсилати за запитом описові повідомлення, що пояснюють його функціонування та його можливості. Ці повідомлення визначають структуру та семантику наданих послуг. Ці обмеження суттєво відхиляються від обмежень об'єктно-орієнтованого програмування, що настійно пропонує зв'язати дані та їх обробку. Коли якийсь компонент потребує функціональності що він не має, він запитує систему про необхідну послугу. Якщо інший компонент системи має таку можливість, їх місцезнаходження буде вказано і, нарешті, клієнтський компонент може споживати послугу. Розглянемо такі популярні додаткові модулі для БПЛА як:

- датчики забруднювачів повітря;
- тепловізори та фото/відео-камери.

Датчики забруднення повітря сильно відрізняються за своїми робочими механізмами [13]. Кожен датчик призначений для одного конкретного забруднювача повітря, такого як тверді частинки або діоксид азоту, і видає різні типи сигналів. Сигнали відповідають концентраціям забруднюючих речовин і, як правило, їх потрібно калібрувати перед використанням. Отже, нам потрібно розробити індивідуальний модуль збору даних, який прив'язаний до кожного датчика для збору сигналу та виробляє специфічні для датчика дані для подальшої обробки в модулі злиття даних. Кожен модуль збору даних запускає власну програму, призначену для кожного датчика. Для економії заряду акумулятора модуль збору даних вбудований у недорогий та енергоефективний мікроконтролер. У прототипах БПЛА використовують такі датчики забруднення повітря:

Датчик твердих частинок (PM) (*OPC-N2, Alphasense Inc.*, Ессекс, Великобританія) оптично підраховує частинки та перетворює концентрацію у масові концентрації ПМ 1, ПМ 2,5 та ПМ 10. Він має вбудований модуль збору даних і передає дані через послідовний порт, емульований *USB*, на зовнішні пристрої [31]. Період вибірки встановлюється на рівні 1,5 с для зразка, але може регулюватися в

діапазоні від 1 с до 30 с для зразка. Кожна вибірка містить 62 байти даних. Цей датчик *OPC* був спеціально протестований для застосування БПЛА.

Датчик діоксиду азоту (*NO 2*) (*NO2-B43F*, *Alphasense Inc.*, Ессекс, Великобританія) – це 4-електродний газовий датчик, який подає струмові сигнали, пропорційні концентрації *NO 2*. Датчик *NO 2* виробляє лише аналогові сигнали. Період вибірки встановлюється на рівні 0,25 с на зразок, але його можна регулювати в діапазоні від 0,01 с до 100 с на зразок. Кожен зразок містить 8 байт даних. Модуль збору даних також передає дані через послідовний порт, емульований *USB* [31].

Вони є як легкими, так і компактними датчиками і придатні для перенесення на БПЛА. Ці датчики були випробувані та рекомендовані Управлінням з досліджень та розробок Агентства з охорони навколишнього середовища США (*EPA*).

У модульній конструкції датчики не надсилають дані безпосередньо на наземну станцію. Швидше, використовують модуль синтезу даних для агрегування даних від датчиків. Потім використовують комунікаційний модуль БПЛА для передачі зведених даних датчика на наземну станцію. Таким чином, є можливість спільно використовувати один канал зв'язку з усіма датчиками, щоб зменшити енергозатратність та вартість системи. Залежно від пропускної здатності даних, необхідної додаткам існує два типи комунікаційних модулів. Одним з них був телеметричний радіозв'язок між БПЛА і наземною станцією, який підходить для передачі даних з низькою швидкістю, але має покриття на великі відстані. Для даних з високою пропускною здатністю застосовують *WiFi* як механізм зв'язку, хоча відстань зв'язку *WiFi* обмежена у порівнянні з телеметричним радіозв'язком.

Камери теплового зору роблять фотографії або відео з тепла, а не з видимого світла. Тепло (інфрачервоне теплове випромінювання) і світло є частинами електромагнітного спектра. Однак камера, яка може виявляти видиме світло, не буде бачити теплового випромінювання і навпаки.

Теплові камери виявляють не тільки тепло. Камери теплового зору виявляють крихітні різниці в теплі, навіть незначні, ніж 0,01 за Цельсієм. Потім ця інформація відображається у вигляді різних кольорів на дисплеї, в тепловому програмному забезпеченні або додатках. Все в нашому житті віддає теплову енергію, навіть лід.

Чим щось гарячіше, тим більше теплової енергії воно виділяє. Ця випромінювана тепла енергія називається «тепловим сигнатуром».

Об'єкти при типовій кімнатній температурі випромінюють енергію у вигляді інфрачервоних хвиль. Коли ви бачите теплові фотографії або відео випромінювання, що оточує людину, тварину або гарячу кружку кави, енергія, яку випромінює об'єкт, зазвичай має діапазон довжин хвиль. Зазвичай це називають спектром випромінювання.

Зі збільшенням температури об'єкта довжини хвиль в межах спектрів випромінювання зменшуються. Гарячіші об'єкти випромінюють коротшу довжину хвилі і вищу частоту випромінювання.

Теплове випромінювання може виникати через речовину або через область простору, яка не містить речовини (вакуум). Тепло, отримане на Землі від Сонця, є результатом електромагнітних хвиль, що проходять через порожнечу або вакуум простору між Землею і Сонцем.

Для покращення відео з камери чи тепловізора використовують програмні засоби стабілізації та усунення дефектів зображення за допомогою обчислювальних потужностей БПЛА. Наведемо декілька технологій що можуть бути використані:

- програмне забезпечення для стабілізації відео. Різко покращує відео, усуваючи високочастотні шуми та дрейф кадрів до кадру. Також надає можливість корегувати обертання кадри від кадру до кадру в додатках з рухом на платформі, таких як безпілотні літаки;

- програмне забезпечення для відстеження сцен та об'єктів. Відстеження сцени забезпечує потужний зворотний зв'язок на основі всієї сцени. Відстежуванні об'єкти можна ізолювати від фону за допомогою розширеного аналізу зображень та оцінки руху, а постійне відстеження можливо навіть тоді, коли огляд відстежуваного об'єкта тимчасово заблокований;

- алгоритми виявлення. Кілька режимів виявлення забезпечують важливу інформацію про ситуаційну обізнаність та забезпечують швидкий зворотний зв'язок, необхідний для ефективної ініціалізації доріжки на рухомих об'єктах.

2.4. Організація комунікації із базовою станцією БПЛА

Базова станція БПЛА використовується для передачі та отримання даних з БПЛА. Вона може бути розташована на землі, у повітрі, чи на воді. У залежності від навколишнього середовища та інформації що повинна бути передана, використовуються різні частоти [32].

Для споживача доступні різні комбінації систем передачі даних (рис. 2.5), які можуть бути використані для роботи БПЛА. Три основні типи даних що необхідно передавати при керуванні БПЛА є:

- контроль БПЛА;
- передача відео;
- телеметрія.

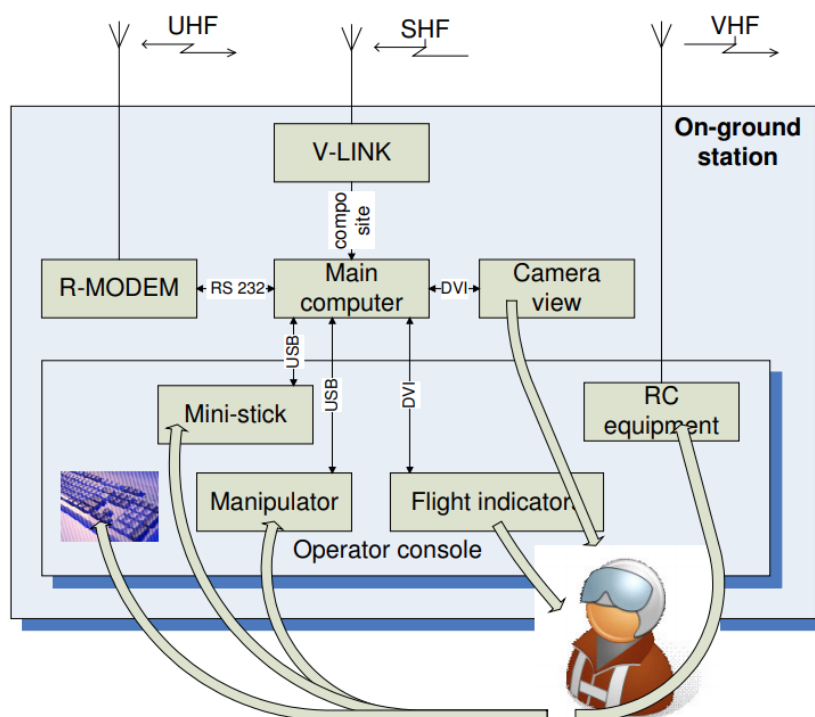


Рис. 2.5. Обладнання базової станції БПЛА

Спрощена схема передачі даних з БПЛА до базової станції зображена на рис. 2.6.

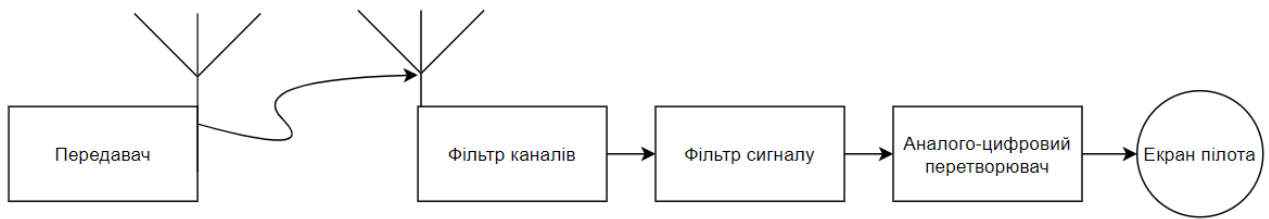


Рис. 2.6. Спрощена схема передачі даних

Кілька речей, які слід згадати щодо конкретних радіочастот, які зазвичай використовуються в системі передачі даних. Найпопулярнішими з цих частот є:

- 900 МГц – здатний проникати через перешкоди, дуже вузька смуга обмежує максимальну швидкість передачі даних;
- 3 ГГц – здатний проникати через перешкоди, обмежена максимальна швидкість передачі даних;
- 4 ГГц – найбільш часто використовувана і збалансована частота, але може стати переповненою;
- 8 ГГц – найкоротший діапазон, має великі максимальні швидкості передачі даних.

Кожний з цих радіодіапазонів має в залежності від ландшафту місцевості. Чим нижча смуга частот, тим більше проникнення в перешкоди між оператором та БПЛА. Це пов'язано з довжиною хвилі кожної з смуг. Чим довша хвиля, тим менша частота і більший діапазон. Схема нижче (рис. 2.7) ілюструє довжину хвилі кожної з чотирьох зазначених вище частот.

Найпопулярнішими лініями передачі даних, що використовуються в базових станціях, є 2,4 ГГц та 900 МГц:

- 4 ГГц – радіус дії 2,4 кілометра, погано справляється в гірських або лісистих районах;
- 900 МГц – радіус дії понад 120 кілометрів, може використовуватися в гірських та лісистих районах, майже не впливаючи на дальність.

Найпопулярнішими лініями передачі даних, що використовуються в базових станціях, є 1,3 ГГц, 2,4 ГГц і 5,8 ГГц

– 3 ГГц – залежно від використовуваної потужності ця система може мати діапазон понад 80 кілометрів. Вада цієї системи – низька якість відео через мінімальну швидкість передачі даних. Однак, оскільки довжина хвилі є відносно великою, це дозволяє посилити можливості проникнення;

– 4 ГГц – дальність цієї системи може бути більше за 30 кілометрів. Вада цієї системи полягає в тому, що багато БПЛА використовують 2,4 ГГц для управління. Якщо для відео використовується 2,4 ГГц, його не можна використовувати для управління, інакше це спричинить перешкоди;

– 8 ГГц – це найпопулярніша частота, що використовується для передачі відео, завдяки своїй короткій довжині хвилі та великій швидкості передачі даних. Це дає чітке відео порівняно з іншими доступними варіантами. Однак завдяки короткій довжині хвилі ця система здатна пройти лише 10 кілометрів і має обмежені можливості проникнення.

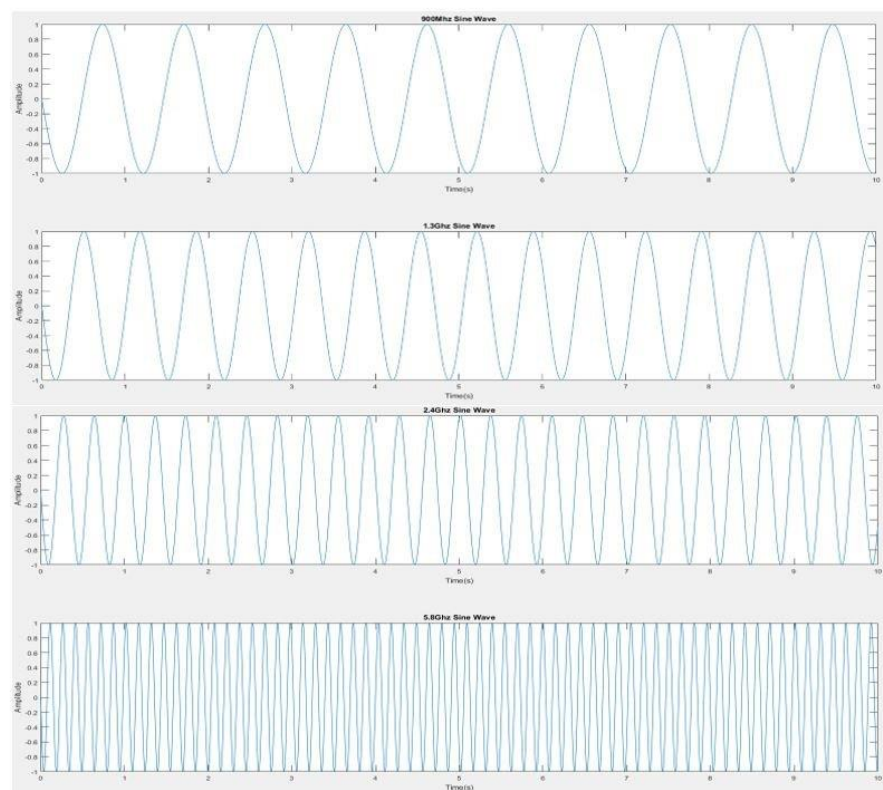


Рис. 2.7. Осцилограма різних частотних діапазонів

Найпопулярнішими частотами лінії передачі даних, що використовуються в базових станціях для телеметрії, є 400 МГц та 900 МГц. Ці частоти мають перевагу

великого діапазону без втрати даних [33]. Однак через більшу довжину хвилі ці системи не можуть передавати великі швидкості передачі даних.

Для прикладу роздивимося наступний сценарій: оператор вирішує зробити географічне відео. Для цього йому знадобляться послуги, що надаються накопичувачем, блоком керування польотом та камерою і модулями зондування.

Різні модулі взаємодіють та обмінюються повідомленнями із системою для виконання цього складного завдання.

1-2. Модуль управління місіями просить систему надати місцезнаходження БПЛА. Модуль навігації отримує *GPS* дані, а система керування польотом інтерпретує їх у місцезнаходження.

3-4. Подібним чином модуль контролю місії запитує у системи доступ до модуля відеокамери та сенсорів, модуль відповідає своїм кодом.

5-6. Модуль управління місіями просить систему надати модуль, що забезпечує управління накопичувачем та той відповідає своїм кодом.

Тепер модуль управління місіями знає коди всіх інших модулів, які йому потрібні, і він самостійно може управляти потоками, які йому необхідні.

7. Модуль управління місіями підписується на потік даних *GPS*, які генеруються модулем навігації.

8. Модуль управління місіями підписується на потік даних з відеокамери.

9-10 Модуль управління місіями командує модулю зберігання для запису таких даних як *GPS* так і відео потоків даних з камери. З цього моменту модуль накопичувача буде зберігати дані на диск без втручання модуля управління місією.

Доступні модулі в БПЛА з модульною архітектурою надають широкий набір послуг, що охоплюють важливу частина загальних функціональних можливостей присутніх у багатьох місіях. Отже, для адаптування БПЛА для нової місії буде достатньо лише переналаштування модуля управління місією, це не додавання нового програмного або апаратного забезпечення.

Крім того, цей абстрактний шар надає деякі бажані можливості системі:

- надмірність;
- паралельність;

- відмовостійкість;
- масштабованість.

Коли модуль розподіляє дані потоку, його можуть приймати кілька модулів. Обробка цієї інформації може бути виконана паралельним або надлишковим способом, наприклад обробка альтернативних відеокадрів у двох модулі або для зберігання двох копій даних датчика у двох різних модулі зберігання.

Аналогічним чином різні модулі можуть надавати ту саму послугу, показник чи потік даних.

Коли модуль запитує у системи певну дію, він не знає точно який саме вузол збирається відповісти на його запит. Це дозволяє у разі несправності модуля, взяти його роботу на себе іншому модулю з еквівалентними функціональними можливостями. Ця архітектура також має достатньо велику ступінь масштабованості та гнучкості [38], тому що це не потрібно знати в заздалегідь, які апаратні вузли надають послуги, чи передають дані.

2.5. Компресія сигналу

Стиснення застосовується майже скрізь. Всі зображення, які ви отримуєте в Інтернеті, стискаються, зазвичай у форматах *JPEG* або *GIF* більшість модемів використовують стиснення, *HDTV* стискається за допомогою *MPEG-2*, а кілька файлових систем автоматично стискають файли при зберіганні та решту ми робимо це вручну. Акуратна річ щодо стиснення, як і в інших темах, які ми розглянемо цей курс полягає в тому, що алгоритми, що використовуються в реальному світі, широко використовують широкий набір алгоритмічних інструментів, включаючи сортування, хеш-таблиці та ШПФ.

Крім того, алгоритми з сильною теоретичною основою відіграють важливу роль у реальних додатках. У цьому розділі ми будемо використовувати загальний термін повідомлення для об'єктів, які ми хочемо стиснути, які можуть бути як файлами, так і повідомленнями. Завдання стиснення складається з двох компонентів, а алгоритм кодування, який приймає повідомлення та генерує

“стиснене” подання, а також алгоритм декодування, який реконструює вихідне повідомлення або деяке його наближення із стисненого подання. Ці два компоненти, як правило, складні пов'язані між собою, оскільки вони обоє повинні розуміти спільне стиснене подання. Розрізняють [36] алгоритми без втрат, які можуть точно реконструювати вихідне повідомлення з стисненого повідомлення та алгоритми з втратами, які можуть лише відновити наближення оригінального повідомлення.

Алгоритми без втрат, як правило, використовуються для тексту, а з втратами для зображень та звук, де невелика втрата в роздільній здатності часто не виявляється або, принаймні, є прийнятною. Втрата вживається в абстрактному розумінні, однак, і не означає випадкові втрачені пікселі, а натомість означає втрату такої кількості, як частотна складова, або, можливо, втрата шуму. Наприклад, можна вважати, що стиснення тексту з втратами буде неприпустимим, оскільки вони уявляють, що відсутні або переключені символи. Натомість розглянемо систему, яка переклала речення на більш стандартні форму або замінили слова синонімами, щоб файл можна було краще стиснути. Технічно стиснення було б втратним, оскільки текст змінився, але "значення" та чіткість повідомлення може бути повністю підтримано або навіть вдосконалено. Була принаймні одна заявка на патент, яка стверджувала, що здатна стиснути всі файли (повідомлення) – патент 5 533 051 із заголовком “Методи стиснення даних” [34]. Заявка на патент стверджувала, що якщо вона застосовується рекурсивно, файл може бути зведений майже до нуля. Але це неможливо, принаймні, якщо вихідні повідомлення можуть містити будь-яку послідовність бітів. Ми можемо це побачити простим аргументом підрахунку. Давайте розглянемо всі 1000-бітові повідомлення як приклад.

Існує 1000 різних повідомлень, які ми можемо надіслати, кожне з яких має бути чітко ідентифіковане декодером. Має бути зрозуміло, що ми не можемо представити стільки різних повідомлень, надіславши 999 або менше бітів всі повідомлення – 999 біт дозволять нам відправити лише 2^{999} чітких повідомлень. Правда в тому якщо будь-яке одне повідомлення скорочується алгоритмом, тоді

якесь інше повідомлення потрібно подовжити. Ви можете перевірити це на практиці, запустивши *GZIP* у файлі *GIF*.

Насправді можна піти далі і показати, що для набору вхідних повідомлень фіксованої довжини, якщо одне повідомлення стискається, тоді середня довжина стиснених повідомлень на всіх можливих входах завжди буде довшою ніж вихідні вхідні повідомлення. Розглянемо, наприклад, 8 можливих 3-бітових повідомлень. Якщо такий є стиснуто до двох бітів, не важко переконати себе, що два повідомлення доведеться розширити до 4 біт, що дає в середньому $3 \frac{1}{8}$ біта. Але патент було видано.

Тип вихідного сигналу має дуже велике значення з точки зору його передачі. Найбільш ємким та часто вживаними у БПЛА є дані закодовані за допомогою цифрового сигналу. Цифровий сигнал – це сигнал, що використовується для подання даних як послідовності дискретних значень; в будь-який момент часу він може приймати лише одне з кінцевої кількості значень. Це контрастує з аналоговим сигналом, який представляє безперервні значення; у будь-який момент часу воно представляє дійсне число в безперервному діапазоні значень.

Прості цифрові сигнали представляють інформацію в дискретних смугах аналогових рівнів. Усі рівні в діапазоні значень представляють однаковий інформаційний стан. У більшості цифрових схем сигнал може мати два можливих допустимих значення; це називається двійковим сигналом або логічним сигналом. Вони представлені двома смугами напруги: одна біля еталонного значення (зазвичай називається як земля або нуль вольт), а інша – поблизу напруги живлення. Вони відповідають двом значенням "нуль" та "одиниця" (або "хибне" та "істинне") булевої системи, тому в будь-який момент часу двійковий сигнал представляє одну двійкову цифру (біт). Через таку дискретизацію порівняно невеликі зміни рівнів аналогового сигналу не залишають дискретної огиначаючої, і в результаті схеми зондування стану сигналу ігнорують. Як результат, цифрові сигнали мають захист від шуму; електронний шум, за умови, що він не надто великий, не впливатиме на цифрові схеми, тоді як шум завжди певною мірою погіршує роботу аналогових сигналів.

Часом використовують цифрові сигнали, що мають більше двох станів; Схема з використанням таких сигналів називається багатозначною логікою. Наприклад, сигнали, які можуть приймати три можливі стани, називаються тризначною логікою.

У цифровому сигналі фізичною величиною, що представляє інформацію, може бути змінний електричний струм або напруга, інтенсивність, фаза або поляризація оптичного чи іншого електромагнітного поля, акустичний тиск, намагніченість магнітного носія інформації тощо. Цифрові сигнали використовуються у всій цифровій електроніці, зокрема обчислювальному обладнанні та передачі даних.

Форма сигналу, що перемикається, представляючи два стани булевого значення (0 і 1, або низький і високий, або хибний і істинний), називається цифровим сигналом або логічним сигналом або двійковим сигналом, коли вона інтерпретується лише двома можливими цифри.

Обидва стани зазвичай представлені певними вимірами електричних властивостей: напруга є найбільш поширеною, але струм використовується в деяких логічних сімействах. Типово визначаються два діапазони напруг для кожного логічного сімейства, які часто безпосередньо не суміжні. Сигнал низький, коли знаходиться в низькому діапазоні, і високий, коли знаходиться у високому діапазоні, а між цими двома діапазонами поведінка може відрізнитися.

Синхронізуючий сигнал – це спеціальний цифровий сигнал, який використовується для синхронізації багатьох цифрових схем. Наведене зображення (рис. 2.8) можна вважати сигналом тактового сигналу. Зміни логіки викликаються або зростаючим, або спадаючим краєм. Висхідний край – це перехід від низької напруги (рівень 1 на схемі) до високої напруги (рівень 2). Падаючий край – це перехід від високої напруги до низької.

У цифрових схемах зазвичай використовується двійкова схема. Хоча значення даних представлені лише двома станами (0 і 1), більші значення можуть бути представлені групами двійкових бітів. Наприклад, в 1-бітовій системі 0 представляє значення даних 0, а 1 представляє значення даних 1. Однак у 2-бітовій системі 00 представляє 0, 01 представляє 1, 10 представляє 2, а 11 – 3. У 16-бітовій системі найбільше число, яке може бути представлене, становить 2^{16} або 65 536. Ці групи

бітів можуть бути розглянуті або як послідовність послідовних бітів, або як паралельна шина. Це дозволяє легко обробляти великі потоки даних [42].

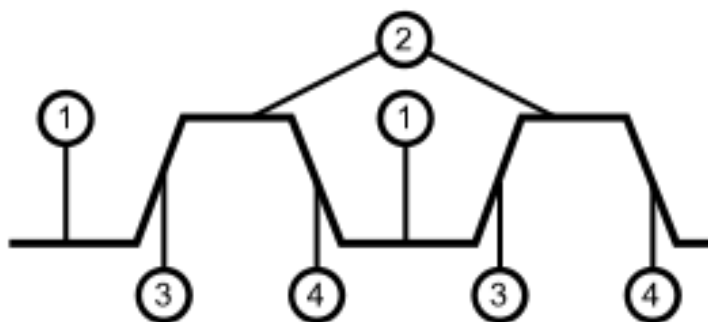


Рис. 2.8. Схема цифрового сигналу

На відміну від аналогових схем, більшість корисних цифрових схем є синхронними, тобто для координації роботи блоків схем існує опорний тактовий сигнал, тому вони працюють передбачуваним чином. Аналогова електроніка працює асинхронно, тобто вона обробляє сигнал, коли він надходить на вхід. Більшість цифрових схем використовують цифровий процесор для обробки даних. Це може бути у формі простого мікроконтролера або більш складного процесора цифрових сигналів, який може фільтрувати та обробляти великі потоки даних, таких як відео. Цифрові сигнали зазвичай використовуються в системах зв'язку, де цифрова передача може передавати дані через канали передачі точка-точка або точка-багатоточка, такі як мідні дроти, оптичні волокна, носії бездротового зв'язку, носії інформації або комп'ютерні шини.

Традиційні аудіо- та комунікаційні системи використовували аналогові сигнали [42]. Однак, завдяки досягненню технологій кремнієвих процесів, можливостей цифрової обробки сигналів, алгоритмів кодування та вимог шифрування – на додаток до збільшення ефективності пропускної здатності – багато з цих систем стали цифровими. Але є сфери, де аналогові сигнали мають традиційне використання або переваги. Більшість систем, які взаємодіють із реальними сигналами (такими як звук, світло, температура та тиск), використовують аналоговий інтерфейс для збору або передачі інформації. Нижче перелічено кілька додатків аналогового сигналу:

- запис та відтворення звуку;
- датчики температури;

- датчики зображення;
- радіосигнали;
- телефони;
- системи управління.

Незважаючи на те, що в багатьох оригінальних системах зв'язку використовувалася аналоговий сигнал (телефони), останні технології використовують цифрові сигнали через їхні переваги – захист від шуму, шифрування, ефективність пропускну здатності та можливість використання повторювачів для передачі на великі відстані. Нижче наведено кілька сфер використання цифрового сигналу:

- системи зв'язку (широкополосний, стільниковий зв'язок);
- мережа та передача даних між комп'ютерами;
- цифрові інтерфейси для обробки сигналу.

Хоча в дуже спрощеній та ідеалізованій моделі цифрової схеми ми можемо побажати, щоб ці переходи відбувалися миттєво, жодна реальна схема не є суто резистивною, і тому жодна схема не може миттєво змінити рівні напруги. Це означає, що під час короткого, скінченного часу переходу вихід може не відображати належним чином вхід і не відповідатиме логічно високій або низькій напрузі.

При обробці сигналу, стиснення даних, – це процес кодування інформації із використанням меншої кількості бітів, ніж вихідне подання. Будь-яке конкретне стиснення є або з втратами, або без втрат. Стиснення без втрат зменшує біти шляхом виявлення та усунення статистичної надмірності. При стисненні без втрат інформація не втрачається. Стиснення з втратою зменшує біти, видаляючи непотрібну або менш важливу інформацію. Як правило, пристрій, який виконує стиснення даних, називається кодером, а той, який виконує зворотний процес (декомпресію), як декодер.

Процес зменшення розміру сигналу часто називають стисненням даних. У контексті передачі даних це називається вихідним кодуванням; кодування, здійснене у джерела даних, перш ніж вони зберігаються або передаються. Кодування джерела

не слід плутати з кодуванням каналу, для виявлення та виправлення помилок або лінійного кодування, засобів для відображення даних на сигнал.

Стиснення корисно, оскільки зменшує ресурси, необхідні для зберігання та передачі даних. Обчислювальні ресурси використовуються в процесах стиснення та декомпресії. Стиснення даних підлягає компромісу між простором і часом. Наприклад, для схеми стиснення відео може знадобитися дороге апаратне забезпечення для того, щоб відео було досить швидко розпаковано, щоб його можна було переглядати в процесі розпакування, а можливість розпакувати відео повністю перед переглядом може бути незручною або вимагати додаткового зберігання. Розробка схем стиснення даних передбачає компроміси між різними факторами, включаючи ступінь стиснення, кількість спотворень, що вводяться (при використанні стиснення даних з втратами), та обчислювальні ресурси, необхідні для стиснення та декомпресії даних.

У рамках дипломної роботи розглянемо різні методи компресії цифрових даних.

Для оцінювання ефективності компресії будемо використовувати такий параметр як ступінь стиснення

$$r = \frac{\text{Розмір даних отриманих із модуля}}{\text{Розмір даних після компресії}}.$$

Коефіцієнт стиснення "2 до 1" означає, що розмір стиснених даних складає половину розміру даних, що передаються з джерела. Високий коефіцієнт компресії визначатиме кращу систему стиснення. Процедури стиснення даних використовуються протягом тривалого часу [36], насамперед у зберіганні текстів, написаних в електронному форматі.

Навіть у цій області прогрес був дуже вражаючим, продуктивність алгоритму стиснення швидко покращується до сьогоdnішнього дня [34].

Розглянемо ефективність компресії різних типів даних за допомогою різних алгоритмів.

Для передачі фотографій з камери чи тепловізора використовується стандарт *JPEG* (*Joint Photographic Experts Group*) що використовується для стиснення

тонального діапазона. Це важливо для мультимедійних файлів, оскільки, на першому етапі стиснення, мультимедійний стандарт для фільмів, *MPEG*, представляє *JPEG*-кодування, кожен кадр стискається окремо, також в ньому присутні кілька функцій для стиснення між кадрами та виявлення руху. *JPEG* визначено у Міжнародному стандарті 10918. *JPEG* має чотири режими та безліч варіантів, що зазвичай використовуються для кодування 24-бітних *RGB* відеозображень. У роботі буде розглянуто послідовний режим, який є стисненням із втратами.

Стандарт *MPEG* було розроблено групою експертів з кінофільмів. Більшість алгоритмів сімейства *MPEG* призначені для стиснення відео і містяться у міжнародному стандарті з 1993 р. Оскільки фільми містять як зображення, так і аудіо інформацію, *MPEG* може стискати обидва. Першим доопрацьованим стандартом був *MPEG-1*. Його метою було створити вихідні відео, які мають розмір кадру 352x240 пікселю, використовуючи бітрейт 1,2 Мбіт/с. Нестиснуте відео може досягати 472 Мбіт/с, його стиснення до 1,2 Мбіт/с є значним, навіть при цій низькій роздільній здатності. *MPEG-1* може передаватися по крученій парі на низькому рівні відстані.

Наступним стандартом *MPEG* був *MPEG-2*, який спочатку був розроблений для стиснення відео, призначених для трансляції, з бітрейтом від 4 до 6 Мбіт/с. Пізніше *MPEG* було розширено для підтримки більших роздільних здатностей. *MPEG-4* призначений для відеоконференцій із середньою роздільною здатністю, але низькою швидкістю кадрів (10 кадрів/сек) і низькою пропускнуою здатністю (64 Кбіт/с).

Стиснення аудіо у форматі *MPEG* здійснюється шляхом дискретизації форми сигналу при 33 кГц, 44,1 кГц або 48 кГц. *MPEG* може обробляти моно, окреме стерео (кожен канал окремо) або спільне стерео. Це реалізовано на трьох рівнях, кожен з яких застосовує додаткові оптимізації для досягнення більш високої компресії.

Рівень 1 – це основна схема стиснення. Цей рівень використовується, наприклад, у системі запису аудіо контейнерів без стиснення.

Рівень 2 додає до базової схеми розширене розподілення бітів. Він використовується для аудіо *CD-ROM* дисків та, наприклад, саундтреків до фільмів.

Рівень 3 додає гібридні фільтри: неоднорідну кількісну оцінку, Хаффман кодування та інші передові методи.

Існує велика різноманітність алгоритмів стиснення та їх варіацій. Я проведу порівняльний аналіз стиснення кількох файлів різного розміру і з використанням різних алгоритмів.

В аналізі було використано наступні 7 типів файлів що теоретично можуть бути передані між блоками БПЛА:

- *dll*: динамічні бібліотеки;
- зкомпільовані C++ файли;
- *txt*: текстові файли;
- *exe*: виконувані файли;
- WAV: аудіофайли;
- *bmp*: файли растрових зображень;
- *img*: файли векторних зображень.

В аналізі було використано такі методи стиснення:

- стандартний метод Хаффмана;
- динамічний метод Хаффмана;
- метод Шиннона-Фано;
- арифметичне стиснення;
- LZW.

Для порівняння та аналізу ефективності вище наведених алгоритмів стиснення спочатку треба розглянути теоретичні аспекти їх роботи.

Стандартний метод Хаффмана. Варто зазначити, що алгоритм було розроблено більш ніж 70 років назад [34], але він все ще використовується у багатьох більш сучасних методах стиснення. Метод ґрунтується на створенні бінарних дерев. У ньому вузол може бути або кінцевим, або внутрішнім. Спочатку все вузли вважаються листям (кінцевими), які представляють сам символ і його вага (тобто частоту появи). Внутрішні вузли містять вага символу і посилаються на два вузла-спадкоємця. За спільною згодою, біт «0» представляє проходження по лівій гілці, а «1» – по правій. У повному дереві N листя і $N-1$ внутрішніх вузлів. Рекомендується,

щоб при побудові дерева Хаффмана відкидалися невикористовувані символи для отримання кодів оптимальної довжини. Оскільки ефективні структури даних черги пріоритетів вимагають часу $O(\log n)$ на вставку, а дерево з n листям має $2n - 1$ вузлів, цей алгоритм працює за час $O(n \cdot \log n)$, де n – кількість символів. Якщо символи відсортовані за ймовірністю, існує метод лінійного часу ($O(n)$) для створення дерева Хаффмана з використанням двох черг, перша з яких містить початкові ваги (разом з покажчиками на пов'язані листя) і комбіновані ваги. (Разом з покажчиками на дерева) поміщається в кінець другої черги. Це гарантує, що найнижча вага завжди буде знаходитися на початку однієї з двох черг кодування Хаффмана.

Динамічний метод Хаффмана. Динамічний метод Хаффмана це метод адаптивного кодування, заснований на кодуванні Хаффмана. Це дозволяє будувати код у міру передачі символів, не маючи початкових відомостей про розподіл джерела, що дозволяє кодувати за один прохід і адаптувати до умов, що змінюються в даних. Перевага однопрохідної процедури полягає в тому, що джерело може бути закодований в реальному часі, хоча код стає більш чутливим до помилок передачі, оскільки всього одна втрата руйнує весь код. У роботі було розглянуто алгоритм *FGK*. Це метод онлайн-кодування, заснований на кодуванні Хаффмана. Не маючи початкових відомостей про частоту появи, він дозволяє динамічно коригувати дерево Хаффмана в міру передачі даних. У дереві Хаффмана *FGK* спеціальний зовнішній вузол, званий 0-вузлом, використовується для ідентифікації знову з'являється символу. Тобто, кожного разу, коли зустрічаються нові дані, виводиться шлях до 0-вузлу, за яким слідує дані. У міру збільшення частоти даних рідина властивість дерева Хаффмана може бути порушена. З цієї причини запускається регулювання. Це досягається послідовною заміною вузлів, піддерев або того й іншого. Вузол даних замінюється вузлом з найвищим порядком тієї ж частоти в дереві Хаффмана (або піддерево з коренем у вузлі з найвищим порядком). Всі вузли-предки вузла також повинні оброблятися таким же чином.

Метод Шиннона-Фано. Алгоритм Шеннона-Фано – один з перших алгоритмів стиснення, який вперше сформулювали американські вчені Клод Шеннон і Роберт Фано. Даний метод стиснення має велику схожість з алгоритмом Хаффмана, який

з'явився на кілька років пізніше і є логічним продовженням алгоритму Шеннона. Алгоритм використовує коди змінної довжини: символ що часто зустрічається кодується кодом меншої довжини, рідко зустрічається – кодом більшої довжини. Коди Шеннона-Фано – беспрефіксні, тобто ніяке кодове слово не є префіксом будь-якого іншого. Ця властивість дозволяє однозначно декодувати будь-яку послідовність кодових слів. Відноситься до імовірнісних методів. Подібно алгоритму Хаффмана, алгоритм Шеннона – Фано використовує надмірність повідомлення, укладену в неоднорідному розподілі частот символів його (первинного) алфавіту, тобто замінює коди більш частих символів короткими двійковими послідовностями, а коди більш рідкісних символів – довшими двійковими послідовностями.

Алгоритм був незалежно один від одного розроблений Шенноном (публікація «Математична теорія зв'язку», 1948 рік) [34] і, пізніше, Фано (опубліковано як технічний звіт). Код Шеннона-Фано будується за допомогою дерева. Побудова цього дерева починається від кореня. Усієї безліччі кодованих елементів відповідають корені дерева (вершині першого рівня). Воно розбивається на дві підмножини з приблизно однаковими сумарними ймовірностями. Ці підмножини відповідають двом вершинам другого рівня, які з'єднуються з коренем. Далі кожна з цих підмножин розбивається на дві підмножини з приблизно однаковими сумарними ймовірностями. Їм відповідають вершини третього рівня. Якщо підмножина містить єдиний елемент, то йому відповідає кінцева вершина кодового дерева; таке підмножина розбиття не підлягає. Подібним чином поступаємо до тих пір, поки не отримаємо всі кінцеві вершини. Гілки кодового дерева розмічаємо символами 1 і 0, як у випадку коду Хаффмана.

При побудові коду Шеннона-Фано розбиття множини елементів може бути вироблено декількома способами. Вибір розбиття на рівні n може погіршити варіанти розбиття на наступному рівні ($n + 1$) і привести до неоптимальності коду в цілому. Іншими словами, оптимальна поведінка на кожному кроці шляху ще не гарантує оптимальності всієї сукупності дій. Тому код Шеннона-Фано не є оптимальним в загальному сенсі, хоча і дає оптимальні результати при деяких розподілах ймовірностей. Для одного і того ж розподілу ймовірностей можна побудувати кілька

кодів Шеннона-Фано, і всі вони можуть дати різні результати. Якщо побудувати всі можливі коди Шеннона-Фано для даного розподілу ймовірностей, то серед них будуть знаходитися і всі коди Хаффмана, тобто оптимальні коди.

Арифметичне стиснення. Арифметичне кодування – це форма кодування даних, що використовується при стисненні даних без втрат. Зазвичай рядок символів представляється з використанням фіксованої кількості бітів на символ, як у коді *ASCII*. Коли рядок перетворюється на арифметичне кодування, часто використовувані символи зберігатимуться з меншою кількістю бітів, а не так часто зустрічаються символи – з більшою кількістю бітів, в результаті чого буде використано менше бітів. Арифметичне кодування відрізняється від інших форм кодування ентропії, таких як кодування Хаффмана, тим, що замість того, щоб розділяти вхід на символи компонентів і замінювати кожен кодом, арифметичне кодування кодує все повідомлення в одне число, дріб довільної точності q , де $0,0 \leq q < 1,0$. Він представляє поточну інформацію як діапазон, що визначається двома цифрами. Сімейство ентропійних кодерів, що називаються асиметричними цифровими системами, дозволяє швидше реалізовувати завдяки безпосередній роботі з одним натуральним числом, що представляє поточну інформацію. У найпростішому випадку ймовірність появи кожного символу однакова. Наприклад, розглянемо набір із трьох символів, A , B та C , кожен з яких однаково ймовірний. Для простого кодування блоків потрібно 2 біти на символ, що марнотратно: одна з бітових змін ніколи не використовується. Тобто, $A = 00$, $B = 01$ і $C = 10$, але 11 не використовується.

Більш ефективним рішенням є представлення послідовності цих трьох символів як раціонального числа в основі 3, де кожна цифра представляє символ. Наприклад, послідовність "*ABBCAB*" може стати $0,0112013$, в арифметичному кодуванні як значення в інтервалі $[0, 1)$. Наступним кроком є кодування цього потрібного числа за допомогою двійкового числа з фіксованою точкою, достатньої точності для його відновлення, наприклад $0,00101100102$ – це лише 10 біт; 2 біти зберігаються в порівнянні з наївним кодуванням блоків. Це можливо для довгих послідовностей, оскільки існують ефективні алгоритми для перетворення бази довільно точних чисел.

Щоб декодувати значення, знаючи, що вихідний рядок мав довжину 6, можна просто перетворити його назад на базу 3, округлити до 6 цифр і відновити рядок.

LZW – це універсальний алгоритм стиснення даних без втрат, створений Авраамом Лемпелем (англ. *Abraham Lempel*), Яковом Зивом (англ. *Jacob Ziv*) і Террі Велчем (англ. *Terry Welch*). Він був опублікований Велчем в 1984 році в якості поліпшеної реалізації алгоритму *LZ78*, опублікованого Лемпелем і Зивом в 1978 році. Алгоритм розроблений так, щоб його було достатньо просто реалізувати як програмно, так і апаратно.

Алгоритм, описаний у роботі Уелча 1984 року, кодує послідовності 8-бітових даних як 12-бітові коди фіксованої довжини. Коди від 0 до 255 представляють 1-символьні послідовності, що складаються з відповідного 8-бітового символу, а коди з 256 по 4095 створюються у словнику для послідовностей, що зустрічаються в даних, коли вони кодуються. На кожному етапі стиснення вхідні байти збираються у послідовність, доки наступний символ не зробить послідовність без коду ще у словнику. Код послідовності (без цього символу) додається до виводу, а новий код (для послідовності з цим символом) додається до словника.

Ідею швидко адаптували до інших ситуацій [39]. Наприклад, на зображенні, заснованому на кольоровій таблиці, природний алфавіт символів – це набір покажчиків таблиць кольорів, а в 1980-х роках багато зображень мали невеликі кольорові таблиці (близько 16 кольорів). Для такого зменшеного алфавіту повні 12-бітові коди погано стискали, якщо зображення не було великим, тому була введена ідея коду змінної ширини: коди зазвичай починаються на один біт ширше символів, що кодуються, і як кожен розмір коду ширина коду збільшується на 1 біт, до деякого встановленого максимуму (зазвичай 12 біт). Коли досягається максимальне значення коду, кодування продовжується за допомогою існуючої таблиці, але нові коди не створюються для додавання до таблиці.

Подальші уточнення включають резервування коду, щоб вказати, що таблицю кодів слід очистити та відновити до початкового стану ("чіткий код", як правило, перше значення відразу після значень для окремих символів алфавіту), та код для позначення кінця даних ("стоп-код", як правило, такий, що перевищує чіткий код).

Код очищення дозволяє повторно ініціалізувати таблицю після її заповнення, що дозволяє кодуванню адаптуватися до змінних шаблонів у вхідних даних. Програмне забезпечення можуть контролювати ефективність стиснення та очищати таблицю, коли існуюча таблиця вже не відповідає вхідному.

Оскільки коди додаються способом, визначеним даними, декодер імітує побудову таблиці так, як він бачить отримані коди. Дуже важливо, щоб кодер та декодер узгоджували різноманітність використовуваних елементів: розмір алфавіту, максимальний розмір таблиці (та ширина коду), чи використовується кодування змінної ширини, початковий розмір коду та чи потрібно використовувати чітке і стоп-коди (і які значення вони мають). Більшість форматів, що використовують *LZW*, вбудовують цю інформацію у специфікацію формату або надають явні поля для них у заголовку стиснення даних. Стиснення *LZW* стало першим широко застосовуваним універсальним методом стиснення даних на комп'ютерах. Великий англійський текстовий файл зазвичай можна стиснути через *LZW* приблизно до половини початкового розміру.

LZW став дуже широко використовуватися, коли він став частиною формату зображення *GIF* у 1987 році. Він також може (необов'язково) використовуватись у файлах *TIFF* та *PDF*

2.6. Аналіз способів передачі даних

У якості способів передачі даних між модулями БПЛА можуть бути використані як дротові так і бездротові способи передачі даних. Кожна із технологій має своє переваги та недоліки.

2.6.1. Дротові технології передачі даних

Дротовий зв'язок передбачає передачу даних за допомогою дротової технології зв'язку. Прикладами дротового зв'язку є телефонні мережі, кабельне телебачення або доступ до Інтернету, а також волоконно-оптичний зв'язок. Більшість дротових мереж

використовують кабелі *Ethernet* для передачі даних між підключеними ПК. Місцеві телефонні мережі часто становлять основу для дротового зв'язку та використовуються як приватними, так і бізнес клієнтами [25]. Сьогодні багато мереж покладаються на використання технології волоконно-оптичного зв'язку як засобу забезпечення швидкої передачі даних. Волоконно-оптична технологія здатна передавати набагато більше сигналів, ніж мідна проводка, зберігаючи цілісність сигналу на великих відстанях.

У даному розділі порівнюємо такі дротові технології передачі даних як:

- *Ethernet*;
- *CAN*;
- *Flex-Ray*.

Ethernet – це технологія, яка з'єднує провідні локальні мережі (*LAN*) і дозволяє пристрою взаємодіяти один з одним по протоколу, що є загальною мережевим мовою. Ця локальна мережа являє собою мережу комп'ютерів і інших електронних пристроїв, яка охоплює невелику площу в вашому офісі, будинку, кімнаті або будівлі. На відміну від *LAN*, глобальна обчислювальна мережа (*WAN*) охоплює набагато більші географічні райони. Крім того, *Ethernet* – це протокол, керуючий процесами передачі даних по локальній мережі. Він також показує, як мережеві пристрої можуть передавати і формувати пакети даних, щоб інші мережеві пристрої в тому ж сегменті мережі могли приймати, обробляти і розпізнавати їх [41]. Будь-які інші пристрої, що мають доступ до географічно локалізованої мережі за допомогою кабелю, наприклад проводового, а не бездротового з'єднання, найчастіше використовують *Ethernet*. Існують різні типи *Ethernet*-кабелів, які використовуються для виконання конкретного завдання в певній ситуації. Нижче перераховані різні типи кабелів *Ethernet*:

- *10Base2/10Base 5* – тонка мережа *Ethernet*;
- *10Base-T* – кручена пара і може досягати швидкості 10 Мбіт/с;
- *100Base-FX* – це дозволяє досягти швидкості 100 Мбіт/с за допомогою багатомодовою волоконно-оптичної мережі;

- *100Base-TX* – аналогічний кручений парі, але з 10-кратним збільшенням швидкості;
- *1000Base-T*- кабель категорії 5 з подвійною кручений парою, що дозволяє розвивати швидкість до одного гігабіта в секунду;
- *1000Base-SX*- засноване на многомодовому оптоволоконному кабелі, що використовує короткий хвильовий сигнал довжиною 850 нанометрів;
- *1000Base-LX* – це також засновано на многомодовому оптоволоконному кабелі, але використовує довгохвильовий сигнал.

Мережа контролерів (*CAN*-шина) – це надійний стандарт шини передачі даних, призначений для того, щоб мікроконтролери та пристрої могли обмінюватися даними один з одним без головного комп'ютера.

Це протокол на основі повідомлень, розроблений спочатку для мультиплексної електричної проводки в автомобілях, щоб заощадити на міді, але також використовується в багатьох інших сферах. Для кожного пристрою дані в кадрі передаються послідовно, але таким чином, що якщо кілька пристроїв передають одночасно, пристрій з найвищим пріоритетом може продовжувати роботу, поки інші чекають. Кадри приймаються всіма пристроями, включаючи передавальний пристрій. *CAN* був розроблений Робертом Бошем, переважно для автомобільної та авіакосмічної індустрії. Він дозволяє зв'язати усі компоненти в один або подвійний дріт званий мережею шини даних на швидкості понад 1 мегабіта [26].

До появи *CAN* шини, агрегати мали велику кількість проводки яка була необхідна для з'єднання різних електронних компонентів. Різниця у кількості дротів між звичайним аналоговим підключенням та *CAN* шиною показана на рис. 2.9 та рис. 2.10.

Схема електроніки сучасних рухомих об'єктів може налічувати десятки а то й сотні блоків управління та різноманітних датчиків. Для з'єднання усіх цих елементів потребується значна кількість дротів та шин.



Рис. 2.9. Аналогове з'єднання блоків рухомого об'єкта

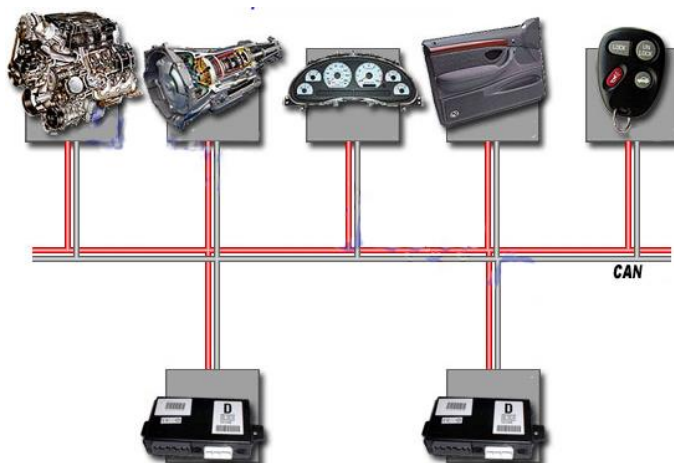


Рис. 2.10. З'єднання блоків рухомого об'єкта за допомогою CAN

Сучасний БПЛА може мати до 70 електронних блоків управління для різних підсистем. Зазвичай найбільшим процесором є блок управління польотом. Інші використовуються для керування моторами, навігації, керування батареєю, телеметрії, тощо. Деякі з них утворюють незалежні підсистеми, але комунікація серед інших є дуже важливою. Підсистемі може знадобитися управління виконавчими механізмами або отримання зворотного зв'язку від датчиків. Для задоволення цієї потреби був розроблений стандарт CAN. Однією з ключових переваг є те, що взаємозв'язок між різними системами об'єкта може дозволити реалізувати широкий спектр функцій безпеки, економії та зручності лише за допомогою програмного

забезпечення – функціональність, яка додасть вартості та складності, якби такі функції були "провідні" за допомогою традиційної автомобільної електрики.

В останні роки був запроваджений стандарт шини *LIN*, який доповнює *CAN* для некритичних підсистем, де швидкість та надійність передачі даних менш важливі.

Flex-ray – високошвидкісний мережевий протокол для рухомих об'єктів, розроблений світовим консорціумом *FlexRay*, основоположником якого є компанія *NXP* спільно з *BMW*, *Daimler*, *Bosch*, *General Motors* і *Volkswagen*. Пропускна здатність протоколу досягає 10 Мбіт/с. Перші специфікації були опубліковані в 2004 році. Консорціум *FlexRay* розпався в 2009 році, але стандарти були прийняті як *ISO* з номерами від 17458-1 до 17458-5.

Підтримуються топології зірка (активна зірка, подвійна зірка) і шина, можливе використання 2 незалежних фізичних каналів передачі даних для підвищення надійності. Шина *FlexRay* працює в тимчасовому циклі з двох сегментів: статичного і динамічного. Статичний сегмент розділений на ділянки для окремих типів обмінів, надаючи гарантії реального часу. Динамічний сегмент працює за аналогією з шиною *CAN*, де учасники обміну можуть захоплювати контроль над шиною при її доступності.

Завдяки високій швидкості – до 10 Мбіт. – при передачі даних з резервуванням, дану шину також можна використовувати для передачі аудіосигналу або відеосигналу з високим ступенем стиснення. Основні особливості шини:

- передача з таймерним управлінням з гарантованою затримкою відгуку;
- можливість передачі інформації з керуванням подіями з призначенням пріоритетів;
- передача інформації по одному або двох каналах;
- висока швидкість передачі. до 10 Мбіт, з паралельною передачею по двох каналах до 20 Мбіт;
- структура у вигляді лінійної шини, зіркоподібній конфігурації або в комбінованому вигляді.

Середа передачі використовується в системі *Flex-ray* – це двухпроводний кабель з кручений парою, де можуть використовуватися як екрановані, так і неекрановані кабелі. Кожен канал *Flex-ray* складається з двох гілок: шина-плюс і шина-мінус.

2.6.2. Бездротові технології передачі даних

Бездротовий зв'язок – це найбільш швидкозростаюча та найяскравіша технологічна сфера в галузі зв'язку. Бездротовий зв'язок – це метод передачі інформації з однієї точки в іншу, без використання будь-яких з'єднань, таких як дроти, кабелі або будь-який фізичний носій.

Як правило, в системі зв'язку інформація передається від передавача до приймача, які розміщені на обмеженій відстані. За допомогою бездротового зв'язку передавач і приймач можуть бути розміщені в межах від декількох метрів (наприклад, модуль навігації та модуль керування польотом) до декількох тисяч кілометрів (супутниковий зв'язок).

Деякі найпоширеніші системи бездротового зв'язку це: *GPRS*, *Wi-Fi Bluetooth* тощо [40].

Є безліч переваг технологій бездротового зв'язку, бездротових мереж та бездротових систем перед дротовим зв'язком, таких як вартість, мобільність, простота встановлення та надійність тощо.

Вартість встановлення проводів, кабелів та іншої інфраструктури виключається при бездротовому зв'язку і, отже, знижує загальну вартість системи порівняно з дротовою системою зв'язку. Встановити дротову мережу в будівлі, перекопати землю, щоб прокласти кабелі та прокласти ці дроти по вулицях, надзвичайно складна, дорога та трудомістка робота.

Як зазначалося раніше, мобільність є головною перевагою системи бездротового зв'язку. Він пропонує свободу пересування, поки все ще підключений до мережі.

Налаштування та встановлення обладнання та інфраструктури мережі бездротового зв'язку дуже прості, оскільки нам не потрібно турбуватися про клопоти

з кабелями. Крім того, час, необхідний для налаштування бездротової системи, як, наприклад, мережа *Wi-Fi*, є набагато меншим порівняно з налаштуванням повної кабельної мережі.

Але бездротові мережі також мають недоліки. Системи бездротового зв'язку використовують відкритий простір як засіб передачі сигналів. Як результат, існує величезна ймовірність того, що радіосигнали однієї системи бездротового зв'язку або мережі можуть перешкоджати іншим сигналам.

Найкращий приклад – це *Bluetooth* і *Wi-Fi (WLAN)*. Обидві ці технології використовують для зв'язку частоту 2,4 ГГц, і коли обидва ці пристрої активні одночасно, існує ймовірність перешкод.

Однією з головних проблем бездротового зв'язку є безпека даних. Оскільки сигнали передаються у відкритому просторі, можливо, зловмисник може перехопити сигнали та скопіювати конфіденційну інформацію.

Висновки за розділом

Безумовно, на поточний момент розроблена дуже велика кількість алгоритмів стиснення даних, велика кількість протоколів передачі даних, але це потребує від інженерів найбільш осмисленого вибору технологій що будуть використовуватись у БПЛА.

Будь який алгоритм стиснення даних окрім своєї ефективності має ще й такі показники як енергозатратність та швидкість опрацювання даних. Ці параметри є дуже важливими для автономного літального апарату.

Бездротові технології передачі даних мають безліч переваг над класичними дротовими, але їх нестабільність та впливовість до зовнішніх факторів ставлять велике питання щодо їх використання. Крім того, комунікаційні технології, які не покладаються на дроти для передачі інформації (голосу чи даних), як правило, вони мають вищу затримку та нижчу надійність.

Загалом, дротовий зв'язок вважається найбільш стабільним з усіх видів послуг зв'язку. Він порівняно не відрізняється від рішень бездротового зв'язку щодо

несприятливих погодних умов. Ці характеристики дозволили дротовому зв'язку залишатися популярним, навіть якщо бездротові рішення продовжували прогресувати.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМУНІКАЦІЇ БЛОКІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БПЛА

У розділі 2 даної роботи було розглянуто типи даних, що найчастіше повинні передаватися між блоками системи управління БПЛА, та технічні засоби за допомогою котрих ці дані можуть бути передані.

Для визначення найбільш надійної та ефективної технології передачі даних потрібно визначити найбільш ефективний з точки зору швидкості, часу виконання та енергоспоживання алгоритм компресії даних, та найбільш надійний канал передачі даних.

3.1. Визначення ефективності алгоритмів компресії

У розділі 2 було розглянуто найпоширеніші типи кодування цифрових даних, що можуть бути використані при розробці технології передачі даних між системами управління рухомого об'єкта.

У рамках цієї роботи було проведено порівняння ефективності стиснення, енергозатратності, та швидкості виконання вищезгаданих алгоритмів кодування.

Розглянемо порівняльну таблицю (Таблиця 1) ефективності різних алгоритмів використаних з різними типами файлів. Програмний код, що був використаний для тестування надано у додатку.

Розрахунок ступеня стиснення: визначальна залежність ступеня стиснення, що було використано

$$g = \left(1 - \frac{L'}{L}\right) * 100,$$

де L' - довжина стисненого файлу за допомогою стиснення алгоритмом із набору;

L – довжина оригінального нестислого файлу.

У табл. 3.1 наведено експериментальні результати тестування п'ятірки алгоритмів, протестованих для 100 різних файлів різної довжини та різних типів.

Таблиця 3.1

Тестування алгоритмів

Тип файла	Стандартний метод Хаффмана	Метод Шиннона-Фано	Динамічний метод Хаффмана	Арифметичне стиснення	<i>LZW</i>
1	2	3	4	5	6
Динамічні бібліотеки	33%	23%	24%	25%	50%
Зкомпільовані файли C++	37%	36%	38%	38%	56%
Текстові файли	35%	37%	40%	41%	54%
Виконувані файли	26%	20%	25%	25%	22%
Аудіофайли	19%	14%	48%	38%	48%
Файли растрових зображень	49%	47%	55%	51%	52%
Файли векторних зображень	23%	22%	25%	33%	46%

Можна зробити висновок, що найкращу поведінку має алгоритм *LZW*, який практично демонструє найвищу компресію та співвідношення для всіх файлів, незалежно від їх довжини. Це можна обумовити більш розвиненим евристичним алгоритмом роботи методу *LZW*. Також у багатьох сучасних процесорах алгоритм кодування *LZW* є апаратно реалізованим. Це дозволяє значно підвищити швидкість виконання процесу кодування. Варто зазначити також те, що усі інші алгоритми, що було розглянуто, показали приблизно однаковий рівень ефективності стиснення для файлів растрових зображень. Це можна обумовити тим, що растрові графічні файли зазвичай містять багато однотипної інформації такої як суміжні або однакові кольори. У той же час, аудіофайли, що зазвичай містять дуже різну за своїм рівнем інформацію, мають один з найгірших рівней стиснення.

Розрахунок швидкості кодування даних: оцінювалось як середня швидкість кодування для 100 різних файлів різної довжини та різних типів. Параметр швидкості вимірюється у мілісекундах. Результати дослідження надані у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Швидкість кодування даних центральним процесором

Тип файла	Стандартний метод Хаффмана	Метод Шиннона-Фано	Динамічний метод Хаффмана	Арифметичне стиснення	<i>LZW</i>
1	2	3	4	5	6
Динамічні бібліотеки	8.67	9.10	8.39	8.52	7.98
Зкомпільовані файли C++	8.22	9.32	8.64	8.63	7.94
Текстові файли	8.80	9.63	8.16	8.45	8.02
Виконувані файли	8.55	9.54	8.32	8.36	8.06
Аудіофайли	8.32	9.67	8.25	8.92	8.15
Файли растрових зображень	8.95	9.35	8.88	8.69	8.54
Файли векторних зображень	8.76	9.84	8.78	8.21	8.20

Розрахунок енергозатратності: параметр енергозатратності будемо рахувати як

$$j = i * p,$$

де I – кількість тактів процесора, що було виконано для компресії одного файла;

p – кількість енергії, що споживається процесором під час одного такту.

Параметр енергозатратності є дуже важливим у таких критичних об'єктах як БПЛА, що повністю залежать від автономного живлення. Але у той же час він є досить складно підраховуємим, тому що залежить від архітектури того чи іншого центрального процесора. У сучасних БПЛА зазвичай використовують процесори архітектури *ARM* або *x86*.

Однак, так як усі тести проводились на основі одного і того ж центрального процесора, величиною p можна знехтувати.

Таким чином параметр енергозатратності вимірюється у таких одиницях як кількість тактів. Результат дослідження надано у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Енергозатратність кодування даних

Тип файла	Стандартний метод Хаффмана	Метод Шиннона-Фано	Динамічний метод Хаффмана	Арифметичне стиснення	<i>LZW</i>
1	2	3	4	5	6
Динамічні бібліотеки	1734500	1414761	2287449	1315011	965261
Зкомпільовані файли C++	2548477	2471611	113465	224508	1057566
Текстові файли	2073548	1013332	1157832	2670645	1677716
Виконувані файли	1195588	1613527	2292912	1768211	2286810
Аудіофайли	1233939	2065571	2176738	1355657	2489867
Файли растрових зображень	1379382	1260066	1505853	2835554	2659881
Файли векторних зображень	2636847	1697526	1695608	2651120	2236469

Для легкості порівняння наведемо стовпчасту діаграму з агрегованими даними з 3 експериментів.

Сучасні БПЛА можуть виконувати безліч різних функцій, починаючи від огляду режимних об'єктів та закінчуючи веденням самотійного вогню. Велика сфера використання пояснює велику кількість датчиків, модулів та обчислювальних блоків, що встановлюються на БПЛА.

Найчастіше у цивільному та військовому секторі БПЛА використовується для отримання фотозображень місцевості. Це можуть бути як ортофотоплани для військових потреб, фотографії ландшафту для потреб будівництва, плани місцевості для планування сільськогосподарської діяльності. Тож розглянемо ефективність

компресії даних обраними алгоритмами саме для такого типу даних як растрове зображення.

Для збереження максимальної кількості деталей та забезпечення максимальної можливої швидкості та надійності передачі даного типу даних дуже актуальна компресія без втрати даних. Цю властивість мають усі розглянуті методи кодування.

Нагадаємо, що БПЛА це автономний пристрій у сенсі того, що має автономне живлення. Зазвичай використовуються літій-полімерні акумулятори. Тож для максимальної ефективності роботи системи БПЛА алгоритм кодування має бути енергоефективним.

Так як радіус зв'язку БПЛА та базової станції може досягати сотень кілометрів, а передача зображень у реальному часі є пріоритетною задачею для комфортного та ефективного використання БПЛА у рамках постановленої задачі, процес кодування графічної растрової інформації має бути максимально швидким.

Зважаючи на наведену інформацію приведемо стовпчасті діаграми із даними щодо ступеня стиснення, енергозатратності та швидкості кодування графічних растрових даних з використання 5 вищенаведених алгоритмів (рис. 3.1, рис. 3.2).

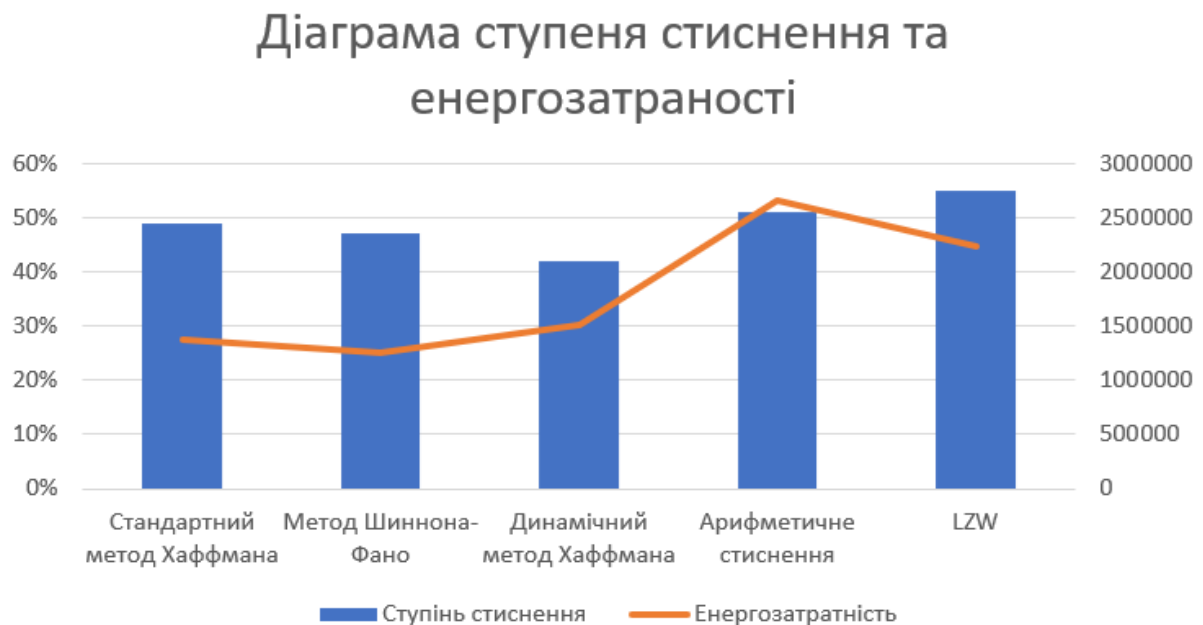


Рис. 3.1. Діаграма ступеня стиснення та енергозатратності

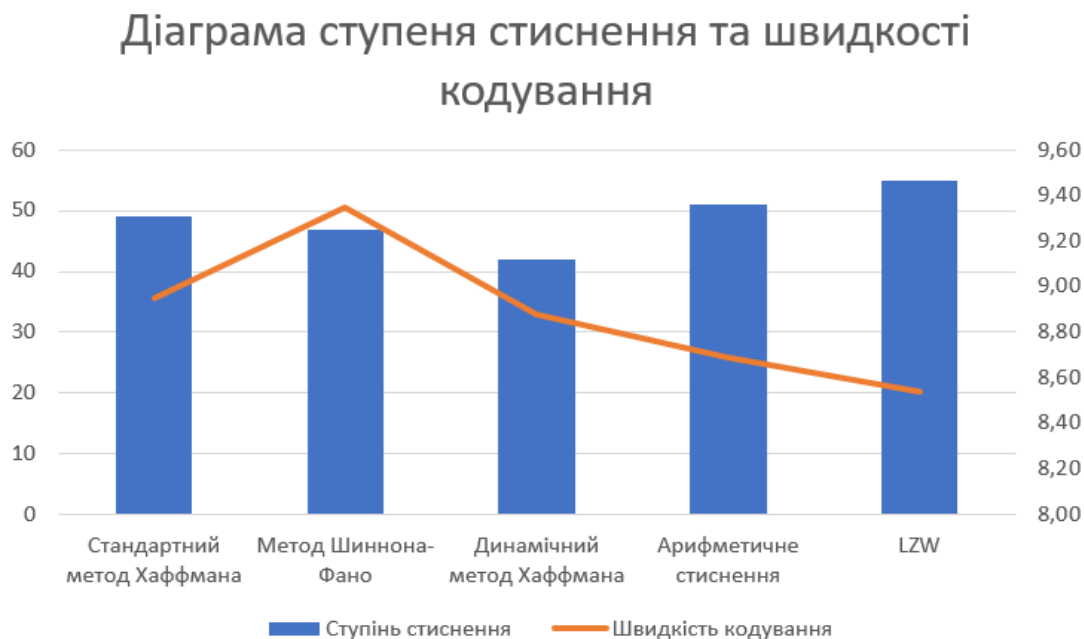


Рис. 3.2. Діаграма ступеня стиснення та швидкості кодування

Проаналізувавши результати дослідження можна зробити висновок, що алгоритм стиснення *LZW* виявився найбільш швидким, найменш енергозатратним, та показав найбільший ступінь стиснення даних растрового графічного файлу.

Це пояснюється тим, що алгоритм *LZW* використовує принципово інший підхід до стиснення даних, має можливість до стиснення даних без необхідності повного їх вичитування, що економить час на вичитування графічного файлу з пам'яті чи носія, та, насамперед є найбільш новітнім із представлених у роботі.

Кількість переданих даних є ключовим параметром у створення надійної технології передачі даних. Більша кількість даних потребує більшої швидкості шини передачі даних, а це тягне за собою більший вплив електромагнітних та інших перешкод. Також для обробки меншої кількості даних центральному процесору, чи іншому обчислювальному блоку потребується менша кількість енергії та часу.

Дослідження показують, що кількість втрачених пакетів на пряму корелює із кількістю переданих пакетів даних. Ця залежність для мережі *Ethernet* відображена на рис. 3.3.

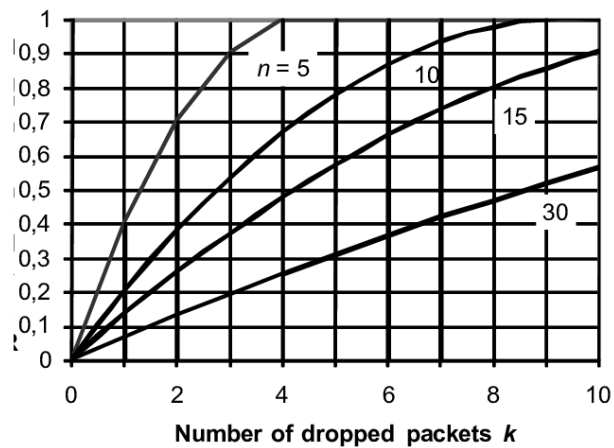


Рис. 3.3. Залежність кількості втрачених пакетів даних від кількості переданих

Тож, високий ступінь компресії даних дозволяє суттєво покращити надійність передачі даних за рахунок зменшення обсягу даних що передаються.

3.2. Визначення надійності технологій передачі даних

Велика кількість шумів та втрачання пакетів інформації, а отже й зменшення надійності технології передачі даних відбувається саме на етапі передачі даних між джерелом інформації та її споживачем.

Дані між блоками управління БПЛА можуть передаватися як з використанням бездротових так і за допомогою дротових технологій. Мета даного підрозділу визначити найбільш надійну технологію передачі даних між блоками літального апарату.

Для визначення найбільш надійної технології було проведено декілька досліджень з використанням мікроконтролерів сімейства *STM32 f103*, *Raspberry Pi* та *ESP32* у якості джерела та споживача інформації.

Для тестування були обрані наступні технології.

У якості дротової технології передачі даних біла обрана технології *CAN*. Ця технології використовується під час проектування комунікації між блоками управління автомобілів, космічних апаратів, та інших рухомих об'єктах.

До її переваг у використанні у рухомих об'єктах в цілому, та у БПЛА належать:

- швидкість, оскільки вона швидша за інші шини, а також здатна надсилати кілька повідомлень одночасно;
- гнучкість, оскільки менша кількість дроту полегшує його встановлення та обслуговування, а також зменшує вагу БПЛА та збільшує його автономність;
- надійність, оскільки ця шина вимагає лише 2 дротів і менш чутлива до магнітних перешкод ніж аналогова проводка;
- вартість, оскільки не вимагає додаткового обладнання та має мінімальні вимоги до систем обробки сигналів.

У якості бездротової технології передачі даних було обрано технологію *Wi-Fi* стандарту *IEEE 802.11n-2009*.

Ця технологія була обрана для дослідження як найбільш вживана у БПЛА громадського вживання для комунікації між БПЛА та базовою станцією. Також ця технологія, що отримала велике розповсюдження серед громадськості для забезпечення доступу до мережі Інтернет для портативних пристроїв має розвинену систему протистояння інтерференціям сигналу та надійну систему захисту даних.

Усі ці параметри є вкрай важливими для забезпечення комунікації між блоками рухомого об'єкта так як втрата зв'язку може бути причиною катастрофи.

3.2.1. Аналіз надійності технологій передачі даних *CAN*

Для аналізу надійності технології передачі даних *CAN* пропонується зробити замір кількості втрачених чи пошкоджених пакетів інформації при передачі їх мережею *CAN* із впливом електромагнітного втручання та перешкод.

У наведеному дослідженні наявність електромагнітного втручання та перешкод було гарантована шляхом прокладання поруч із неекранованими дротами ліній *CAN HIGH* та *CAN LOW* кабелю живлення із активним навантаженням у вигляді двигуна постійного струму потужністю 440Вт за напругою 12В, у той час як високий логічний рівень у мережі *CAN* також дорівнював 12В. Швидкість шини даних 100кб/с.

Функціональна схема підключення компонентів надана на рис. 3.4.

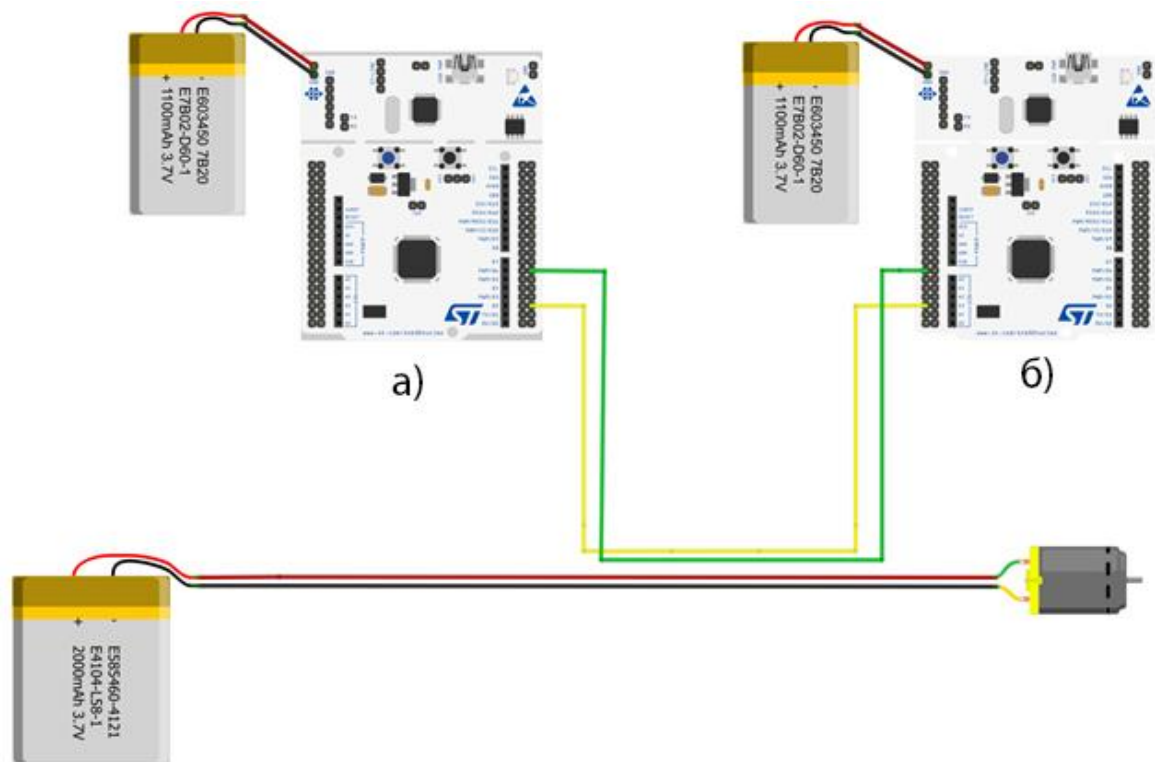


Рис. 3.4. Функціональна схема дослідження

Для оцінки надійності передачі даних з використанням даної технології була проведена послідовна передача 65000 послідовних символів з пристрою джерела (а) до пристрою приймача (б).

Під час дослідження оцінювалась відповідність прийнятих даних до відправлених. Кожен прийнятий символ, що не відповідає відправленому, або не прийнятий взагалі символ, буде вважатися некоректним.

Таким чином ми зможемо зімітувати ситуацію передачі масиву даних між обчислювальними блоками БПЛА за допомогою зазначеної технології передачі даних.

Обрахувавши співвідношення некоректних до коректних прийнятих символів отримаємо коефіцієнт надійності передачі даних. Сформулюємо формулу

$$g = \left(1 - \frac{Z'}{Z}\right) * 100\%,$$

де Z' - кількість отриманих некоректних пакетів;

Z – кількість отриманих коректних пакетів.

Результати дослідження наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати передачі даних

Відправлено символів	65000
Прийнято символів	65000
Коректних символів	65000
Некоректних символів	0

Обрахуємо коефіцієнт надійності

$$g = \left(1 - \frac{0}{65000}\right) * 100\% = 100\%.$$

Для погіршення умов під'єднаємо до існуючої схеми ще один електродвигун з такими ж параметрами для того, щоб подвоїти електромагнітні впливи на передачу сигналу та повторимо дослідження. Результати дослідження наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Результати передачі даних

Відправлено символів	65000
Прийнято символів	64998
Коректних символів	64998
Некоректних символів	2

Обрахуємо коефіцієнт надійності

$$g = \left(1 - \frac{2}{65000}\right) * 100\% = 99.9\%.$$

3.2.2. Аналіз надійності технологій передачі даних *Wi-Fi* стандарту *IEEE 802.11n*

Для аналізу надійності технології передачі даних *Wi-Fi* пропонується зробити замір кількості втрачених чи пошкоджених пакетів інформації при передачі їх мережею *Wi-Fi* із зовнішнього генератора паразитного сигналу на тій же частоті, що використовується для передачі даних.

У наведеному дослідженні два мікрокомп'ютера *Raspberry PI* обмінюються між собою визначеним набором даних. Наявність паразитного сигналу було гарантовано за допомогою мікроконтролера *ESP32*, що за допомогою спеціального програмного забезпечення виконував роботу з глушіння сигналу. Функціональна схема підключення компонентів надана на рис. 3.5.

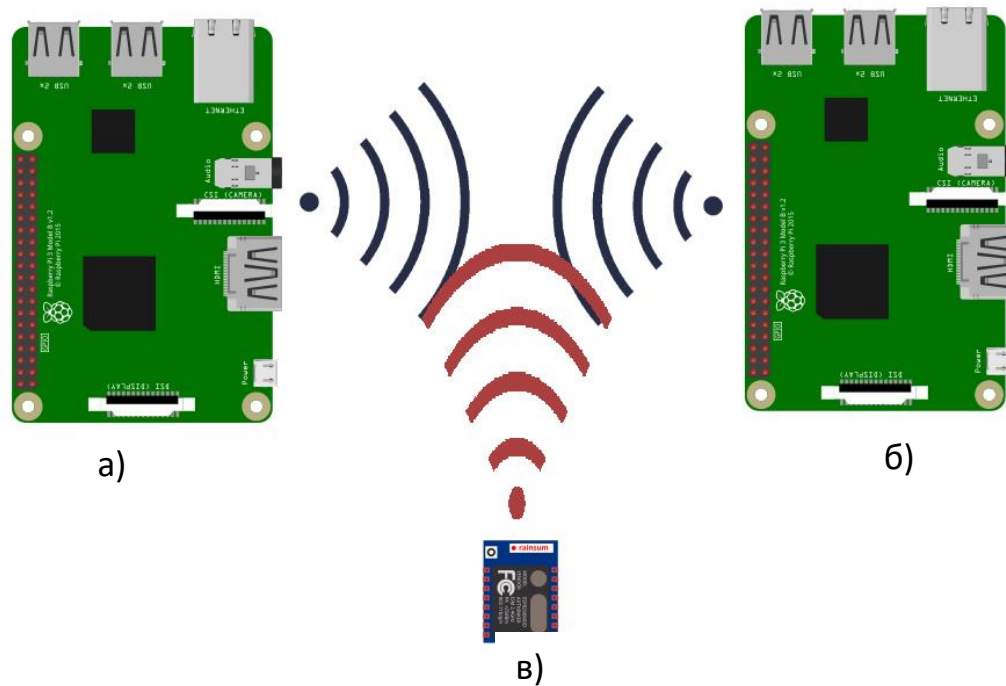


Рис. 3.5. Функціональна схема

Для оцінки надійності передачі даних з використанням даної технології була проведена послідовна передача 65000 послідовних символів з пристрою джерела (а) до пристрою приймача (б) з різними режимами роботи пристрою глушіння (в).

Під час дослідження оцінювалась відповідність прийнятих даних до відправлених. Кожен прийнятий символ, що не відповідає відправленому, або не прийнятий взагалі символ, буде вважатися невалідним.

Обрахувавши співвідношення некоректних до коректних прийнятих символів отримаємо коефіцієнт надійності передачі даних. Сформулюємо формулу

$$g = \left(1 - \frac{Z'}{Z}\right) * 100\%,$$

де Z' – кількість отриманих некоректних пакетів;

Z – кількість отриманих коректних пакетів.

Проведемо два дослідження.

На першому етапі пристрій глушіння буде працювати у режимі *DOS (Denial of Service)*, у цьому режимі пристрій глушіння буде постійно намагатися до *Wi-Fi* мережі пристрою передавача таким чином завантажуючи його процесор та засорюючи радіоефір.

Цей метод глушіння небезпечний тим, що через перезавантаження процесору пристрою передавача, блок управління може увійти в аварійний режим та перестати виконувати свої функції.

Результати дослідження наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Результати передачі даних

Відправлено символів	65000
Прийнято символів	48965
Коректних символів	48965
Некоректних символів	16 035

Обрахуємо коефіцієнт надійності

$$g = \left(1 - \frac{16035}{65000}\right) * 100\% = 75.3\%.$$

На другому етапі пристрій глушіння буде працювати у режимі посилення некоректних пакетів даних, що будуть містити команду від'єднання, від ім'я справжнього передавача усім споживачам. Таким чином ця атака направлена головним чином на пристрій приймач.

Мета цього способу у тому, щоб відправити на пристрій приймач команду від'єднання від мережі джерела даних.

Цей метод глушіння небезпечний тим, що пристрій приймач не буде мати доступу до мережі джерела, а тож не зможе передати статус помилки та будь які інші показники, що може бути критичним для комунікації між блоками БПЛА. Результати дослідження наведені у табл. 3.7.

Результати передачі даних

Відправлено символів	65000
Прийнято символів	548
Коректних символів	548
Некоректних символів	64 452

Обрахуємо коефіцієнт надійності

$$g = \left(1 - \frac{64\,452}{65\,000}\right) * 100\% = 0.84\%.$$

Висновки за розділом

У даному розділі визначені поняття ступеня компресії даних, енергозатратності та швидкості компресії.

Було проведено порівняльний аналіз обраних алгоритмів компресії даних для різних видів файлів та визначено найбільш ефективний алгоритм компресії растрових графічних зображень.

Визначено основні характеристики підбору методів компресії даних, що є найбільш значущими для використання у системах комунікації блоків БПЛА. Такими характеристиками є ступінь стиснення, енергозатратність та швидкість кодування.

У другому підрозділі було визначено поняття надійності технології передачі даних.

Було проведено порівняльний аналіз дротової технології передачі даних *CAN* та бездротової технології *Wi-Fi*.

У ході досліджень було визначено технологію передачі даних *CAN* як найбільш надійну технологію для передачі даних з урахуванням штучно створених перешкод. Було визначено алгоритм компресії *LZW* як найбільш ефективний для використання у блоках управління рухомим об'єктом.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи оглянуто математичну модель БПЛА, визначено основні параметри та параметри що мають вплив на характеристики та застосування БПЛА.

Варто зазначити, що з моменту появи у 1910 року безпілотні літальні апарати суттєво змінились.

На даний момент, сучасні БПЛА пройшли великий путь розвитку довжиною більш ніж у 20 років. За цей час було привнесено велику кількість різних підходів та парадигм створення програмного та апаратного забезпечення. Пріоритетом у розробці програмно-апаратних комплексів для використання у БПЛА завжди були, та залишаються по сьогоднішній швидкодія, надійність, легкість та масштабованість.

Станом на сьогодні найбільш розвиненою та гнучкою програмно-апаратною архітектурою БПЛА є модульна архітектура під'єднання обчислювальних блоків. Модульність дозволяє реалізувати легку інтеграцію нових обчислювальних одиниць у систему, полегшити їх розробки та пришвидшити написання програмного забезпечення. Окрім цього модульна архітектура дозволяє розподілювати потоки інформації таким чином, щоб один й той самий потік могли приймати декілька блоків.

Модульна архітектура з головним обчислювальним комп'ютером та блоком контролю місії надає можливість швидко змінювати цільове призначення БПЛА простою заміною обчислювального блоку, блоку контролю місії, чи інших датчиків та блоків.

Розглянуто стиснення даних як спосіб покращення надійності технології передачі даних за рахунок зменшення їх обсягу.

На поточний момент розроблено велику кількість алгоритмів стиснення даних, що потребує від інженерів найбільш осмисленого вибору технологій що будуть використовуватись у БПЛА.

Важливими показниками окрім ефективності є такі показники як енергозатратність та швидкість опрацювання даних. Ці параметри є дуже важливими для БПЛА, що має чітко визначену кількість енергії.

Розглянуто дротові та бездротові засоби передачі даних.

Бездротові технології передачі даних мають безліч переваг над класичними дротовими, але їх нестабільність та впливовість до зовнішніх факторів ставлять велике питання щодо їх використання. Крім того, комунікаційні технології, які не покладаються на дроти для передачі інформації (голосу чи даних), як правило, вони мають вищу затримку та нижчу надійність.

Загалом, дротовий зв'язок вважається найбільш стабільним з усіх видів послуг зв'язку. Він порівняно не відрізняється від рішень бездротового зв'язку щодо несприятливих погодних умов. Ці характеристики дозволили дротовому зв'язку залишатися популярним, навіть якщо бездротові рішення продовжували прогресувати.

Розглянуто будову бортових систем безпілотного літального апарату, проведено їх порівняльний аналіз із системами інших рухомих об'єктів таких як автомобіль та літак. У ході аналізу виявлено спільності та відмінності між архітектурою будови бортових систем. Зазначено важливі параметри та характеристики систем управління та технологій їх комунікації.

Проаналізовано та вивчено структуру модулів безпілотного літального апарату. Чітко визначено критичні та допоміжні модулі. Описано схему взаємодії модулів. Визначено вплив кількості передаваної інформації на надійність передачі даних.

Стиснення даних використовується в системах зберігання даних або системах передачі на відстань, для текстових даних, звуку або зображення, представлених цифровим способом формат. Це пояснює важливість дослідницьких експериментів із стисненням даних. Методи стиснення зображення переважає обробка сигналів у сфері інформаційних технологій.

Швидке збільшення кількості додатків, які використовують 2D та 3D зображення, передачу графічних файлів в Інтернеті вимагає розробки спеціальних технік та особливо спеціалізованих стандартів.

Стиснення зображення є складною процедурою, що об'єднує велику кількість алгоритмів. Тому коефіцієнт спотворення є визначальним при виборі рівня стиснення, оскільки відповідно до алгоритму, він може досягати дуже високих рівнів

стиснення, якщо деталі зображення не важливі або робота відбувається з бінарними зображеннями.

У ході досліджень виявлено та визначено найбільш ефективний алгоритм компресії растрових графічних зображень. Найбільшу ефективність стиснення показав алгоритм *LZW*. Цей результат обґрунтовується тим, що цей алгоритм є найбільш інноваційним серед представлених у роботі.

З точки зору швидкості виконання він також є найбільш оптимальним, так як даний метод стиснення був розроблений з ідеєю найпростішої реалізації як на апаратному так і на програмному рівні.

Важливим критерієм алгоритму стиснення даних, що використовується у блоках системи управління безпілотним літальним апаратом є його енергоефективність. Цей параметр має прямий вплив на автономність про продуктивність польоту.

Алгоритм кодування *LZW* має можливість бути реалізованим за допомогою апаратних засобів. Таким чином, будучи реалізованим за допомогою апаратного рівня центрального процесора, даний алгоритм буде мати дуже велику перевагу над іншими.

У ході досліджень запропоновано використання технології передачі даних *CAN* у якості технології передачі даних між блоками системи управління БПЛА.

Результати досліджень підтверджують правильність вибору даної технології.

У ході дослідження був змодельований можливий вплив електромагнітного випромінювання на надійність передачі даних між блоками системи управління БПЛА. Так як габаритні розміри, вага, та об'єм БПЛА мають критичне значення та прямий вплив на його льотні та робочі характеристики, внутрішнє компонування має бути максимально щільним. Щільність компонування не дає можливості розділити лінії живлення та лінії передачі даних, а так як у випадку із автономним літальним об'єктом рахунок має кожен грам ваги, не завжди є можливість використання екранованого кабелю.

Тож це дослідження є репрезентативним та може бути використано у якості підтвердження надійності технології передачі даних. У дослідженні було виявлено велику стійкість технології передачі даних *CAN* до електромагнітних перешкод, та

запропонована можливість її використання у якості технології передачі даних між блоками системи управління БПЛА.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцків В.В. Теоретичні основи створення і структурна організація компонентів безпроводних сенсорних мереж підвищеної ефективності: дис. Яцків В.В. Тернопільський національний технічний університет, 2016. – 327 с.
2. Кульпак Н.В. Забезпечення надійної передачі інформації при впливі перешкод у телекомунікаційних мережах. Хмельницький національний університет, 2018. – 5 с.
3. Харченко В. С. Гарантоздатні системи та багатоверсійні обчислення: аспекти еволюції / В. С. Харченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 2009. – 59 с.
4. Бабич В. Д. Завадостійкість каналів зв'язку : навч. посібн. / В.Д. Бабич, О.Д. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев // К. : КВІУЗ, 2001. – 150 с.
5. Зайцев С. В. Математична модель оцінки достовірності передачі інформації в безпроводних мережах за умов впливу структурних завад / С.В. Зайцев // Молода наука України. Перспективи та пріоритети розвитку : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, (Київ, 26–27 грудня 2013р.). – К., 2014. – С. 174 – 175)
6. Schulzrinne, H., et al., RFC 3550, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Application, 2013.
7. Rosenberg, J., et al., RFC 3261, SIP: Session Initiation Protocol, 2002.
8. Spitzer, C., Digital Avionics Systems: Principles and Practice 2nd Edition, Blackburn Press, 2001.
9. Eck Ch., "Navigation, Algorithms with applications to unmanned helicopters", Dissertation at the Swiss federal institute of technology Zurich, 2001.
10. Цыбизов, А. А. Оценка эффективности сетей связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2009. – 24 с.
11. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера. Серия: Мир программирования, 2004. – 368 с.
12. Су Цзюнь. Повышение эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе многопутевой маршрутизации / Су Цзюнь, В.В. Яцків,

А.О.Саченко // Фізика, математика, інформатика. Вестник Брестского государственного технического университета, Брест, 2010. – 21 – 24 с.

13. Казимир В. В. Проектування комп'ютерних систем на основі мікросхем програмованої логіки: монографія / С. А. Іванець, Ю. О. Зубань, В. В. Казимир, В. В. Литвинов. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 313 с.

14. *Qijun Gu, Drew R. Michanowicz, Chunrong Jia Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling. School of Public Health, University of Memphis*, 2018. – 15 с.

15. *Drone Motor Control Development*, 2017. – 5 с.

16. *Eshtaartha Basu Drone Flight Controller / System in Package Based on AM335x*, 2018. – 5 с.

17. *Enric Pastor, Juan Lopez and Pablo Royo A hardware/software architecture for UAV payload and mission control. Department of Computer Architecture, Technical University of Catalonia*, 2006. – 8 с.

18. *Denis Kotarski, Petar Piljek Mathematical Modelling of Multirotor UAV. Mechanical Engineering, Karlovac University of Applied Sciences*, 2016. – 6 с.

19. Безантакос С., Шмідт-Отт Ф., Біскос Г. Оцінка ефективності економічного та легкого оптичного лічильника частинок *Alphasense* для використання на борту безпілотних літальних апаратів. Аерозоль. Наук. Технол, 2018 р. – 392 с.

20. *Feinberg S., Williams R., Hagler G., Low J., Smith L., Brown R., Garver D., Davis M., Morton M., Schaefer J., et al.* Сітка датчиків повітря *CitySpace*: Застосування даних з високою роздільною здатністю з мережі недорогих технологій датчиків повітря для вивчення забруднення міського повітря; Матеріали Міжнародної аерозольної конференції; Сент-Луїс, Міссурі, 2018.

21. *Chang SY, Vizuete W., Valencia A., Naess B., Isaka V., Palma T., Breen M., Arunachalam S.* Наук. Загальне оточення, 2015. – 538 с.

22. *P. Iscold, G. A. S. Pereira, and L. A. B. Torres, "Development of a hand-launched small uav for ground reconnaissance," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 2010. – 348 с.

23. *A Modular Software Architecture for UAVs* Taygun Kecec, Baris Can Ustundag, Mehmet Ali Guney, Alper Yildirim, Mustafa Unel Faculty of Engineering and Natural Sciences Sabanci University Orhanli-Tuzla 34956, Istanbul, Turkey, 2013.
24. J. Lopez, P. Royo, E. Pastor, C. Barrado, and E. Santamaria, «A middleware architecture for unmanned aircraft avionics,» in *Proceedings of the 2007 ACM/IFIP/USENIX international conference on Middleware companion, ser. MC '07*. New York, NY, USA: ACM, 2007. – 24 с.
25. R. Beard, T. McLain, D. Nelson, D. Kingston, and D. Johanson, “Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature uavs,” *Proceedings of the IEEE*, 2006. – 1324 с.
26. E. D. Jones, R. S. Roberts, and T. C. S. Hsia, “Stomp: a software architecture for the design and simulation of uav-based sensor networks,” in *ICRA'03*, 2003. – 3326 с.
27. Vahid, F., T. Givardis, *Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Introduction*, Morgan Kaufmann, 2005.
28. Pratt, R., *Flight Control Systems: Practical Issues in Design and Implementation*, Institution of Electrical Engineers (IEE), 2000.
29. *A Modular Design Approach to A Reconfigurable Unmanned Aerial Vehicle*, Victor Maldonado, Prithviraj Sarker and Souma Chowdhury, 2013.
30. H. Lim, J. Park, D. Lee, and H. J. Kim, “Build your own quadrotor: Open-source projects on unmanned aerial vehicles,” *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 3, 2021. pp. 33–45.
31. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB*. – Москва: Техносфера, 2006. – 616 с.
32. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
33. Дрововозов В. І., Хемраєв А.К. Використання МІМО-систем для підвищення надійності телекомунікаційних систем критичного застосування, Національний авіаційний університет, 2010. – 4 с.

34. Kimura N, Latifi S. *A Survey on Data Compression in Wireless Sensor Networks*[C]// *Information Technology: Coding and Computing, International Conference on. IEEE Computer Society*, 2005. – 13 с.
35. Sadler C M, Martonosi M. *Data Compression Algorithms for Energy-Constrained Devices in Delay Tolerant Networks*[J]. *In Proc. of the ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems SenSys*, 2006. – 278 с.
36. Zhou Y L, Fan X P, Liu S Q, et al. *Improved LZW algorithm of lossless data compression for WSN*[J]. *Computer Science & Information Technology IEEE International Conference on*, 2010. – 527 с.
37. ДСТУ IEC 60870-5-101:2014. Пристрої та системи телемеханіки. Частина 5-101. Протоколи передавання.
38. *STMicroelectronics* [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: *digikkey.com*. Режим доступу – <https://www.digikkey.com/en/supplier-centers/stmicroelectronics>, вільний.
39. *Choosing a Ground Station* [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: *ardupilot.org*. Режим доступу – <https://ardupilot.org/plane/docs/common-choosing-a-ground-station.html>, вільний.
40. *Drone Communication – Data Link* [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: *911security.com*. Режим доступу – <https://www.911security.com/learn/airspace-security/drone-fundamentals/drone-communication-data-link>, вільний.
41. *Onboard Video Processing Software and Hardware for Unmanned Systems* [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: *unmannedsystemstechnology.com*. Режим доступу – <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/sightline-applications/>, вільний.
42. *CAN Bus for UAVs, an essential communication protocol* [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: *embention.com*. Режим доступу – <https://www.embention.com/news/can-bus-for-uavs/>, вільний.
43. Математична модель польоту БПЛА [Інтернет-ресурс] / Web-сайт: <http://earchive.tpu.ru/>. Режим доступу – <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/29429/1/TPU191073.pdf>, вільний.