

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ ” 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА  
РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Мережа передавання даних на основі технології Li-Fi»

Виконавець: \_\_\_\_\_ Данило ДОЛГОВ  
(підпис)

Керівник: \_\_\_\_\_ Володимир КЛИМЧУК  
(підпис)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Денис БАХТІЯРОВ  
(підпис)

Київ 2023

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання кваліфікаційної роботи

Долгова Данила Руслановича

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

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Мережа передавання даних на основі технології Li-Fi»  
затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. № 421/ст
2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: аналіз мережі передачі даних на основі технології Li-Fi
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; аналіз існуючих безпроводових систем передавання даних. недоліки існуючих систем. способи усунення недоліків; основи побудови та функціонування технології Li-Fi; апаратурна реалізація передачі даних за допомогою Arduino та технології Li-Fi.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди презентації в програмному пакеті Microsoft Power Point.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023 - 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Аналіз існуючих безпроводових систем передавання даних. Недоліки існуючих систем. Способи усунення недоліків.	26.05.2023- 29.05.2023	Виконано
4	Основи побудови та функціонування технології Li-Fi.	30.05.2023- 07.06.2023	Виконано
5	Апаратурна реалізація передачі даних за допомогою Arduino та технології Li-Fi .	08.06.2023- 14.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

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

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Володимир КЛИМЧУК  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис випускника)

Данило ДОЛГОВ  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Мережа передавання даних на основі технології Li-Fi» містить 58 сторінок, 23 рисунків, 6 таблиць, 20 використаних джерел.

СТАНДАРТИ WI-FI, ПЕРСОНАЛЬНА МЕРЕЖА BLUETOOTH, ПЕРСОНАЛЬНА МЕРЕЖА ZIGBEE, МЕРЕЖА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ LI-FI, VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS (VLC), ПРОГРАМНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ARDUINO.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних в мережі на основі технології Li-Fi.

Предмет дослідження – мережа передачі даних на основі технології Li-Fi.

Мета кваліфікаційної роботи – метою цієї роботи є дослідження можливості практичного застосування передачі даних за допомогою Arduino та технології Li-Fi.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

1. Провести аналіз особливостей застосування технології Li-Fi.
2. Оцінити можливість використання технології Li-Fi.
3. Сформувати архітектуру та визначити апаратні складові мережі.

Метод дослідження – методи теорії електрозв'язку, методи теорії кодування, у роботі експериментально перевірено роботу коду на Arduino для передачі даних. Натурно представлено роботу коду.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при вивченні технології Li-Fi та в навчальному процесі.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ. НЕДОЛІКИ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ. СПОСОБИ УСУНЕННЯ НЕДОЛІКІВ.....	10
1.1. Безпроводові системи передавання даних.....	10
1.1.1. Технологія Wi-Fi.....	10
1.1.2. Технологія Bluetooth.....	15
1.1.3. Технологія ZigBee.....	20
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1.....	25
РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LI- FI.....	26
2.1. Основи технології Li-Fi.....	26
2.2. Ключові особливості застосування технології Li-Fi.....	28
2.3. Область застосування Li-Fi.....	30
2.4. Архітектура та Стандарти Li-Fi.....	32
2.5. Продуктивність Li-Fi.....	34
2.6. Недоліки та переваги Li-Fi.....	35
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2.....	36
РОЗДІЛ 3 АПАРАТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO ТА ТЕХНОЛОГІЇ LI-FI.....	38
3.1. Апаратура Arduino.....	38
3.1.1. Цифрові та аналогові виводи.....	40
3.1.2. Чим може керувати Arduino.....	40
3.2. Побудова приймальної та передавальної частини Li-Fi на основі плати Arduino.....	40
3.2.1. Передавальна частина Li-Fi на основі плати Arduino.....	41

3.2.2. Приймальна частина Li-Fi на основі плати Arduino.....	42
3.3. Написання програми для Arduino.....	44
3.3.1. Програма для передавальної частини Li-Fi.....	44
3.3.2. Програма для приймальної частини Li-Fi.....	45
3.4. Тестування виконаної роботи.....	47
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3.....	48
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТОК А КОД ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ.....	53
ДОДАТОК Б КОД ПРИЙМАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ.....	56

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AFH ( Adaptive Frequency Hopping ) – адаптивне перемикання частоти

EDR (Enhanced Data Rate) - підвищена швидкість передачі даних

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - інститут інженерів з електротехніки та радіоелектроніки

VLC ( Visible Light Communication ) - зв'язок по видимому світлу

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) - метод мультиплексування (поєднання кількох потоків даних в один спільний простір)

BPSK (Binary Phase Shift Keying) – двійкова фазова модуляція

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурна фазова модуляція

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурно-амплітудна модуляція

CSMA-CA ( Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance ) - метод множинного доступу із упізнанням несучої й усуненням колізій

WPAN (Wireless personal area network) - бездротова персональна мережа

WLAN (Wireless local area network) - бездротова локальна мережа

Gbps (Gigabits Per Second) – гігабіт в секунду

Mbps (Megabits Per Second) – мегабіт в секунду

MHz ( Megahertz ) – мегагерц

THz (Terahertz) – терагерц

GHz (Gigahertz) – гігагерц

MAC ( Media Access Control interface ) - інтерфейс керування доступом до медіа

PHY ( Physical interface ) – фізичний інтерфейс

VPN ( Virtual private network ) – віртуальна приватна мережа

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Запровадження бездротових мереж зв'язку відіграє важливу роль у сучасному світі телекомунікацій, і тому проблема їх розвитку є дуже актуальною. Зараз ми все більше потребуємо спілкування, передачі та зберігання інформації, що пов'язано з розширенням нашого суспільства. Нові умови життя змушують нас розуміти, що інформаційна сфера стала ключовим фактором інтелектуального, економічного та оборонного потенціалу держави та суспільства загалом.

Бездротові дані стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Wi-Fi присутній скрізь, але, на жаль, його постійне використання неможливе. Частоти, використовувані Wi-Fi технологією, недостатньо для задоволення потреб цієї цифрової революції.

Настає момент, коли Wi-Fi більше не зможе впоратися зі зростаючим попитом на дані, тому світ повинен готувати наші мережі до майбутнього, щоб відповідати вимогам підключення завтрашнього дня. За допомогою Li-Fi ми зможемо використовувати спектр, який більш ніж у 1000 разів ширший, ніж весь спектр, що використовується для радіочастот. Li-Fi дозволяє використовувати значно більше точок доступу, ніж Wi-Fi на радіочастотах, і таким чином досягає високої швидкості передачі даних.

**Мета і завдання дослідження.** Метою цієї роботи є дослідження можливості практичного застосування передачі даних за допомогою Arduino та технології Li-Fi. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

1. Провести аналіз особливостей застосування технології Li-Fi.
2. Оцінити можливість використання технології Li-Fi та Arduino.
3. Сформулювати архітектуру та визначити апаратні складові мережі.

**Об'єктом дослідження** – процес передачі даних в мережі на основі технології Li-Fi.

**Предметом дослідження** – мережа передачі даних на основі технології Li-Fi.



**Методи дослідження.** Методи теорії електрозв'язку, методи теорії кодування, у роботі експериментально перевірено роботу коду на Arduino для передачі даних. Натурно представлено роботу коду.

**Практичне значення отриманих результатів.** Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати навчальному процесі.

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

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

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ. НЕДОЛІКИ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ. СПОСОБИ УСУНЕННЯ НЕДОЛІКІВ

### 1.1. Безпроводові системи передавання даних

Бездротові системи передачі даних - це інформаційна технологія для бездротової передачі інформації на відстані між двома або більше об'єктами. Інформація може передаватися за допомогою інфрачервоного випромінювання, радіохвиль, світла або лазерів.

Найпоширеніші типи бездротових системи передачі даних в радіодіапазоні, з якими ми постійно стикаємося:

- WPAN. Персональні мережі, Bluetooth, ZigBee.
- WLAN. Локальна мережа, Wi-Fi.

#### 1.1.1. Технологія Wi-Fi [1]

Технологія Wi-Fi (бездротова мережа Fidelity) була розроблена Асоціацією WECA на базі стандарту широкосмугової бездротової мережі IEEE 802.11 з метою заміни провідного інтерфейсу Ethernet. Основним стандартом для налаштування бездротових локальних мереж (WLAN) є IEEE 802.11 [1].

Стандарт IEEE 802.11 мав безперервні поліпшення, що призвело до створення сімейства специфікацій під назвою IEEE 802.11 з літерними індексами a, b, c, d, e, g, h, i, j, k, m, n, o, p, q, r, s, u, v, w. З цього сімейства лише п'ять стандартів (a [2], b [3], g [4], i [5] та n [6]) мають найбільше значення і популярні серед виробників пристроїв. Решта специфікацій є додатковими, що включають вдосконалення та коригування уже прийнятих стандартів.

З метою просування бездротових пристроїв було сформовано організацію під назвою Wi-Fi Alliance. Цей альянс відповідає за процес сертифікації пристроїв,

вироблених різними виробниками, і надає дозвіл на використання бренду Wi-Fi членам Wi-Fi Alliance. Присутність логотипу Wi-Fi на пристрої гарантує надійну роботу та взаємодію між пристроями при створенні бездротових локальних мереж (WLAN), навіть якщо пристрої різних виробників використовуються одночасно.

На сьогоднішній день пристрої, що підтримують Wi-Fi, виготовляються відповідно до стандарту IEEE 802.11ac. Для забезпечення безпечного з'єднання також може використовуватись стандарт IEEE 802.11i. Крім того, наявність логотипу Wi-Fi на пристрої показує, що пристрій працює у діапазоні 2,4 ГГц або 5 ГГц.

У 1997 році була прийнята перша специфікація стандарту IEEE 802.11, яка встановила можливість передачі даних зі швидкістю 1 і 2 Мбіт/с у діапазоні частот 2,4 ГГц. Для контролю доступу до фізичного середовища (радіоканалу) використовувався метод CSMA-CA.

Метод CSMA-CA працює наступним чином: для визначення стану каналу (зайнятий або вільний) використовується алгоритм, що оцінює рівень сигналу в каналі. Це досягається шляхом вимірювання потужності сигналу на вході приймача та якості сигналу.

Якщо потужність прийнятих сигналів нижче встановленого порогового значення, канал вважається вільним. У разі, якщо потужність перевищує порогове значення, канал вважається зайнятим.

Стандарт IEEE 802.11 [1] визначає протоколи для забезпечення зв'язку з бездротовими пристроями, які підтримують Wi-Fi, включаючи бездротові маршрутизатори та точки доступу. Бездротові точки доступу підтримують різні стандарти IEEE (див. табл. 1.1).

Кожен стандарт є поправкою, яка була офіційно схвалена з часом. Ці стандарти працюють на різних частотах, надають різну пропускну здатність та підтримують різну кількість каналів.

Кожна нова технологія Wi-Fi має свої переваги і недоліки. Розробники постійно вдосконалюють початкові параметри, спрямовуючись на збільшення швидкості та стабільності зв'язку.

## Основні характеристики стандартів

Стандарт	IEEE 802.11a [2]	IEEE 802.11b [3]	IEEE 802.11g [4]	IEEE 802.11n [6]
Діапазон частот, GHz	5.15-5.25 5.67-5.85	5.15-5.25 5.67-5.85	2.4-2.483	2.4-2.483 5.15-5.25 5.67-5.85
Доступ до радіоканалу	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA
Кількість абонентів на один канал	64	64	64	64
Максимальна швидкість обміну даними	54 Мбіт/с	11 Мбіт/с	54 Мбіт/с	480 Мбіт/с
Метод модуляції	OFDM	BPSK	OFDM	BPSK, QPSK, 16- QAM, 64-QAM
Дальність дії в приміщенні	10-20	20-100	20-50	10-20

Розробники специфікації 802.11n врахували сумісність компонентів, що базуються на цій специфікації, з пристроями 802.11b або 802.11g у діапазоні 2,4 ГГц та з пристроями 802.11a у діапазоні 5 ГГц. У нових мережах 802.11n все ще використовуються багато раніше встановлених бездротових клієнтів. Тому при впровадженні високошвидкісних бездротових локальних мереж важливо забезпечити підтримку цих клієнтів адміністратором.

### **Mesh-мережі Wi-Fi**

Mesh-мережа представляє собою мережу з кількох рівнів, в якій кожна робоча станція підключена до декількох інших робочих станцій і може виконувати функції комутатора [7]. Усі елементи цієї мережі мають однакове значення і статус. Кожен пристрій має багато з'єднань з іншими пристроями.

Такий тип мережі має низку **переваг**:

- Незалежність мережі, оскільки кожен учасник мережі функціонує як сервер і клієнт одночасно. Не потрібен централізований провайдер, оскільки мережа є децентралізованою.

- Навіть у випадку раптового відключення від глобальної мережі, локальна мережа все ще знаходиться в межах досяжності.

- Мережа динамічна і має автоматичну настроювану маршрутизацію.

- Існує можливість підключення mesh-мереж через звичайний Інтернет.

До **недоліків** таких мереж можна віднести наступні аспекти:

- Початковий запуск і налаштування сітчастої мережі вимагають значних зусиль і складностей.

- Ефективність мережі досягається лише при значній кількості учасників.

- Завдяки новизні даного типу мережі, ресурси можуть бути обмеженими.

- Відсутність гарантованої ширини каналу та якості зв'язку може бути проблемою.

На рис 1.1. відображено схему створення багатокрокової мережі з використанням Wi-Fi.

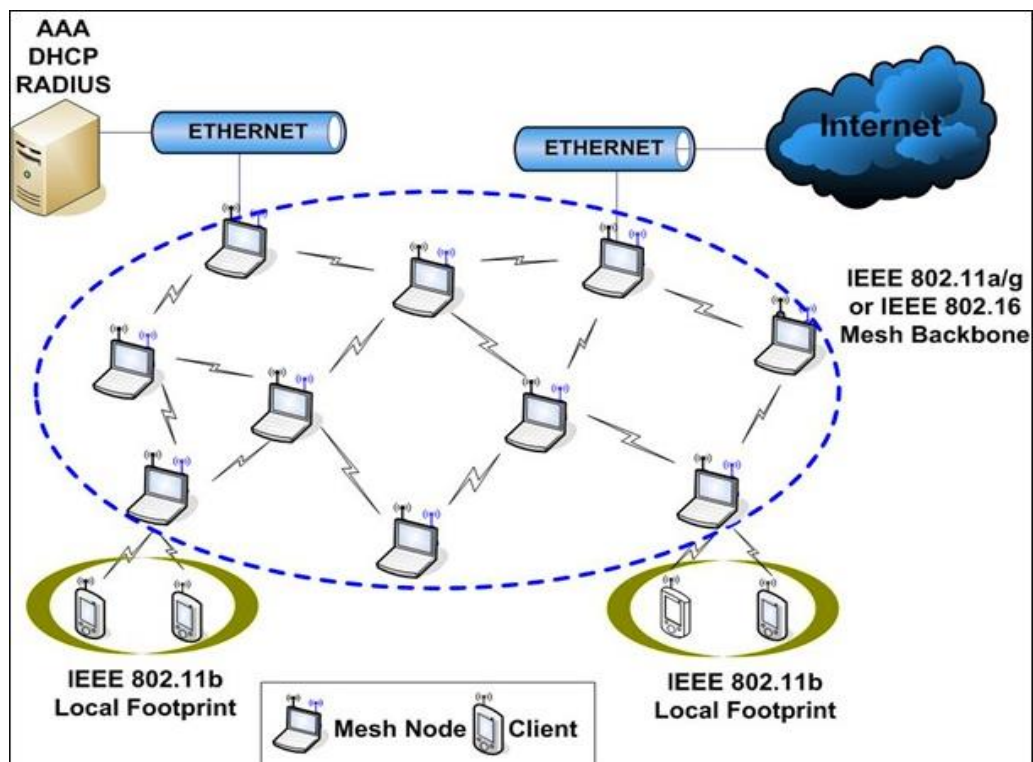


Рис. 1.1. Схема створення багатокрокової мережі з використанням Wi-Fi

## **Недоліки Wi-Fi**

**Безпека:** Незважаючи на те, що бездротові мережі використовують різні методи шифрування, Wi-Fi залишається вразливим до злому. Існує високий ризик злому через його бездротову технологію, особливо в громадських місцях. Оскільки публічні Wi-Fi мережі доступні для всіх, хакери можуть використовувати підроблений ідентифікатор мережі. Без належної попередньої згоди користувачі можуть підключитися до такого підробленого ідентифікатора і стати жертвами кібератак.

### **Методи захисту:**

- Регулярно оновлюйте прошивку роутера до останньої версії.
- Налаштуйте функції віддаленого доступу з обережністю.
- Налаштуйте мережу, щоб була невидимою (схуйте її ім'я, SSID).
- Створіть підмережі з функцією гостьового доступу.
- Використовуйте фільтрацію та шифрування з'єднань за MAC-адресами. •

Обмежте дальність передачі сигналу, щоб зменшити зону підключення.

- Розгляньте можливість придбання роутера з вбудованим брандмауером або підтримкою VPN.
- Періодично перевіряйте кількість підключених пристроїв у мережі.
- Встановлюйте спеціальні програми, додатки або обладнання для додаткового захисту.

**Діапазон:** одним з основних викликів, з якими стикаються користувачі Wi-Fi, є обмежена дія сигналу. Це може бути спричинено великою відстанню до точки доступу, наявністю перешкод, таких як стіни або меблі, або слабким сигналом, що надходить від точки доступу.

### **Рішення для подолання цієї проблеми включають:**

- Розташування роутера у центральній частині будинку або офісу, щоб максимально розповсюдити сигнал.
- Використання розширювачів Wi-Fi (ретрансляторів) або мережевих мостів для розширення зони покриття.

- Зміна радіодіапазону: багато маршрутизаторів працюють як у діапазонах 2,4 ГГц, так і 5 ГГц. 5 ГГц частотний діапазон, як правило, має менше перешкод і більшу пропускну здатність, тому, якщо це можливо, варто оновити пристрої до 5 ГГц.

### 1.1.2. Технологія Bluetooth [8]

Bluetooth, який працює за стандартом IEEE 802.15[8], був першою технологією, що дозволила створити WPAN (безпроводову персональну мережу). Цей стандарт забезпечує передачу даних і голосу на короткі відстані (10-100 метрів) у діапазоні частот 2,4 ГГц і дозволяє підключати ПК, мобільні телефони та інші пристрої навіть без прямої видимості між ними.

Технологія Bluetooth підтримує два типи з'єднань: "точка-точка" і "точка-багато точок". Кілька пристроїв, які використовують один канал, можуть утворювати пікомережу. У такій мережі один пристрій виступає як головний (master), а решта є залежними (slave) пристроями. Пікомережа може мати до семи активних підлеглих пристроїв, а інші підлеглі пристрої залишаються у "запаркованому" стані та синхронізуються з головним пристроєм. Коли взаємодіють декілька пікомереж, вони утворюють "розсіяну мережу".

У кожній пікомережі присутній лише один головний пристрій, але підлеглі пристрої можуть бути членами різних пікомереж. Крім того, головний пристрій однієї пікомережі може виконувати роль підлеглого пристрою в іншій пікомережі (див. Рис. 1.2).

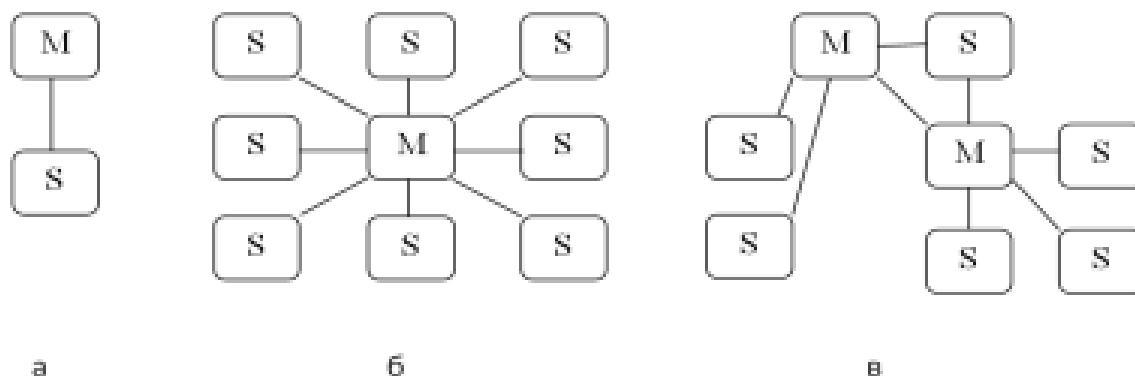


Рис. 1.2. Пікомережі. а - з одним залежним пристроєм; б - з кількома залежними пристроями; в - розгалужена мережа

Зазвичай розробники використовують технологію Bluetooth для бездротової заміни дротового послідовного з'єднання між двома пристроями (див. Рис. 1.3). Для встановлення підключення та передачі даних розробник повинен програмно реалізувати верхні рівні стека протоколу Bluetooth за допомогою команд інтерфейсу хост-контролер. Це включає в себе реалізацію профілю взаємодії послідовного порту (SPP - Serial Port Profile) і профілю ідентифікації служби (SDP - Service Discovery Profile).



Рис. 1.3. Підключення пристроїв між собою

### Різні версії специфікації Bluetooth [9], [10]:

#### Різні версії специфікації Bluetooth [9], [10]:

**Bluetooth 1.0 і 1.0B (1999)** - це були початкові специфікації Bluetooth, але виникли проблеми з їх впровадженням, що уповільнило розвиток Bluetooth. Bluetooth 1.1 (2001) - ця версія включала покращену надійність і сумісність, хоча повна зворотна сумісність не була досягнута на 100%.

**Bluetooth 1.2 (2003)** - Bluetooth 1.2 (Baseline Data Rate) стала широко поширеною технологією Bluetooth. Введення технології AFH допомогло уникнути перешкод для Wi-Fi та інших технологій на одній частоті. Швидкість підключення була покращена.

**Bluetooth 2 (2004)** - Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) включав трибітове кодування, що збільшило швидкість передачі даних з 1 до 3 Мбіт/с (на практиці до 2,1 Мбіт/с). Покращене управління перешкодами і зменшене енергоспоживання.



**Bluetooth 2.1 (2007)** - у цій версії було введено Secure Simple Pairing (SSP), що зробило процес з'єднання швидшим і безпечнішим. Зашифрування стало обов'язковим, що спричинило покращення безпеки і зниження споживання енергії.

**Bluetooth 3 (2009)** - Тоді, коли Bluetooth 2 представив EDR для підвищення пропускної здатності даних до 3 Мбіт/с, режим високої швидкості версії 3.0 дозволив протоколу Bluetooth використовувати наявну Wi-Fi інфраструктуру для досягнення теоретичної швидкості до 24 Мбіт/с.

**Bluetooth 4 (2010)** - Була представлена Bluetooth Low Energy під назвою "Bluetooth Smart".

**Bluetooth 4.1 (2013)** - Вона забезпечує ефективніший обмін даними і кращу сумісність з частотами LTE. Bluetooth 4.1 дозволяє підключення з меншими ручними втручаннями, і пристрої можуть виступати як клієнти, так і концентратори, що дозволяє пристроям Bluetooth взаємодіяти один з одним. З Bluetooth 4.1 пристрої можуть переходити на хаб, вбудований у комп'ютер, або на окремий ключ.

**Bluetooth 4.2 (2014)** - Була розроблена з урахуванням Інтернету речей (IoT). Bluetooth 4.2 збільшила розмір корисного навантаження в Bluetooth-пакеті в 10 разів, що значно зменшило накладні витрати і дозволило передавати 2,5 рази більше даних. Версія IPv6 (6LoWPAN) підтримується для малопотужних бездротових персональних мереж (WPAN), що дозволяє мільярдам пристроїв мати унікальну IP-адресу.

**Bluetooth 5 (2016)** - Це більш надійна версія з подовженим часом автономної роботи. Bluetooth 5 збільшила дальність передачі на вулиці з 50 до 200 метрів. Служби локації також покращилися, оскільки тепер вони можуть передавати більше інформації до підключення. Першими смартфонами, що підтримують Bluetooth 5, були Galaxy S8, iPhone 8 і X.

**Bluetooth 5.1 (2019)** - Застосування більшої кількості антен дозволяє досягти кращої точності відстеження. Кешування загальних профілів атрибутів (GATT) прискорює процес парування шляхом збереження попередніх налаштувань.

**Bluetooth 5.2 (2020)** - Функція керування потужністю (LE Power Control - LEPC) дозволяє регулювати потужність, яку можуть запитувати пристрої на одному рівні.

Протокол розширених атрибутів (EATT) дозволяє виконувати паралельні операції між клієнтами та серверами у низькопотужних пристроях.

**Bluetooth 5.3 (2021)** - Поступове оновлення до версії 5.3 забезпечує покращену стабільність, безпеку та продуктивність. Периферійні пристрої можуть використовувати центральний пристрій для переліку бажаних каналів. Раніше ця можливість була доступна лише з центрального пристрою. Принцип дії технології AFH (Adaptive Frequency Hopping - адаптивне частотне переключення).

Відомо, що технології Bluetooth і Wi-Fi оперують у спільному неліцензованому діапазоні частот 2,4 ГГц. Це означає, що у випадках, коли Bluetooth-пристрої перебувають у зоні дії бездротових пристроїв і взаємодіють між собою, можуть виникати конфлікти, які можуть вплинути на продуктивність цих пристроїв. Проте технологія AFH (Adaptive Frequency Hopping - адаптивне частотне переключення) допомагає запобігти таким конфліктам. Під час передачі даних Bluetooth використовує стрибкоподібну зміну частотного каналу, враховуючи, які канали частот слід ігнорувати і з якими Wi-Fi-пристроями необхідно обмінюватися даними. Рисунок 1.4 ілюструє принцип роботи технології AFH.

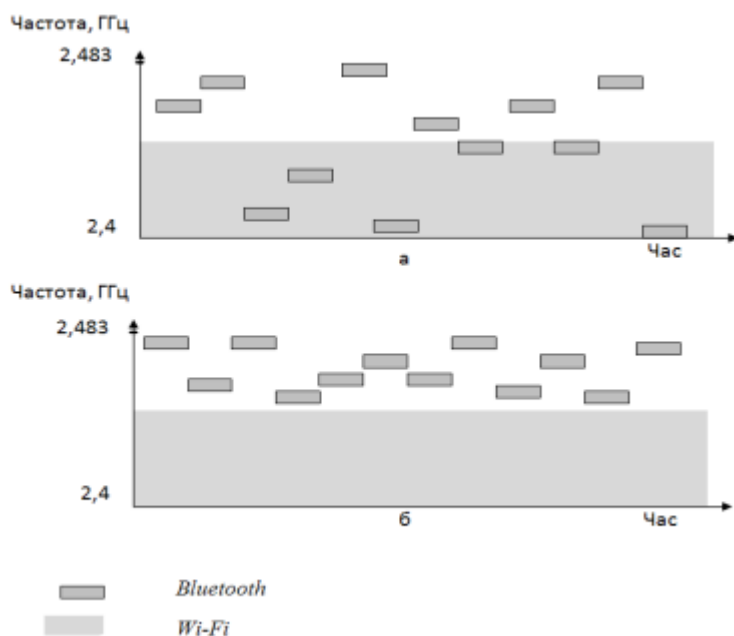


Рис. 1.4. Принцип дії технології AFH. а – колізій; б - перехід від колізій за допомогою адаптивної перестройки частоти.

Для здійснення обміну даними за допомогою технології AFH необхідно використовувати від 20 до 30 каналів. У зв'язку з тим, що для обробки сигналу Bluetooth загалом використовується 79 каналів, а для кожного каналу потрібна ширина смуги 1 МГц, зменшення кількості необхідних каналів може допомогти скоротити використовуваний частотний діапазон і уникнути перекриття сигналів від пристроїв Bluetooth і Wi-Fi.

Основною метою технології Bluetooth є заміна провідного послідовного з'єднання. Профіль SPP, який використовується для організації підключення, є одним з багатьох профілів, які розробники можуть використовувати на своїх пристроях.

Технологія Bluetooth включає різні профілі, такі як загальний профіль доступу, профіль виявлення послуги, профіль бездротової телефонії, профіль інтеркому, профіль гарнітури, профіль віддаленого доступу до мережі, профіль факсу, профіль доступу до локальної мережі, профіль обміну даними (загальний обмін об'єктами), профіль передачі даних (Profile Object Push Profile), профіль передачі файлів (File Transfer Profile), профіль синхронізації (Synchronization Profile) та інші.

### **Недоліки Bluetooth:**

1. Обмежена швидкість передачі даних: У порівнянні з іншими бездротовими технологіями, Bluetooth має відносно низьку швидкість передачі даних. Наприклад, Bluetooth 3.0 і Bluetooth 4.0 мають швидкість до 25 Мбіт/с. Це пов'язано з енергоефективним характером Bluetooth, що призводить до повільнішого механізму передачі даних. У порівнянні з Wi-Fi Direct, Bluetooth значно відстає за швидкістю передачі. Це робить його менш підходящим для передачі великих файлів, таких як аудіо або відео. Bluetooth використовується переважно для передачі невеликих зображень або документів.

2. Обмежена площа покриття: Максимальна дальність з'єднання Bluetooth складає 100 метрів. Bluetooth має обмежений діапазон зв'язку, який менший ніж у Wi-Fi. Діапазон з'єднання Bluetooth залежить від версії та характеристик пристроїв. Пристрої, які потрібно підключити, повинні знаходитися в межах цього діапазону для забезпечення зв'язку.

3. Безпека: Bluetooth має різні механізми безпеки, але через використання радіочастотного спектра, рівень безпеки Bluetooth вважається нижчим. Зловмисники можуть легко отримати доступ до особистих даних через Bluetooth, особливо якщо вони знаходяться в межах обмеженої зони. Через це не рекомендується використовувати Bluetooth для передачі важливої конфіденційної інформації.

4. Проблеми сумісності: Існують питання з сумісністю Bluetooth, хоча більшість реалізацій базуються на стандарті. Це пов'язано з різними профілями, драйверами та версій.

### *1.1.3. Технологія ZigBee [12]*

Технологія ZigBee з'явилася на ринку після появи бездротових технологій передачі даних Bluetooth і Wi-Fi. Поява технології ZigBee переважно пов'язана з потребою у низькому енергоспоживанні для певних операцій, наприклад, дистанційного керування освітленням, дверима гаража або зчитування інформації з датчиків. Головними критеріями вибору технології бездротової передачі для цих випадків є низьке енергоспоживання і низькі витрати. Це пов'язано з обмеженою пропускнуою здатністю, оскільки більшість датчиків живляться від вбудованого акумулятора, який має працювати протягом кількох місяців або навіть років.

У протилежному випадку, якщо користувачу доведеться щомісячно замінювати батарейку датчика відкриття-закриття гаражних воріт, це значно змінить його ставлення до бездротових технологій. Наявні технології передачі даних Bluetooth і Wi-Fi не задовольняли ці критерії, оскільки вони дозволяли передавати дані з високою швидкістю, споживали багато енергії і мали високу вартість апаратної частини.

У 2001 році Робоча група № 4 IEEE 802.15 розпочала розробку нового стандарту, який відповідав багатьом вимогам. Зокрема, апаратна частина, що реалізує бездротову передачу даних, повинна мати низьке енергоспоживання (з терміном служби батареї від кількох місяців до кількох років), передача інформації повинна відбуватися з низькою швидкістю, а обладнання має бути доступним за низьку ціну.

В результаті було розроблено стандарт IEEE 802.15.4 [12]. Багато джерел відносять стандарт IEEE 802.15.4 до технології ZigBee, і навпаки, ZigBee відноситься до стандарту IEEE 802.15.4.

Стандарт IEEE 802.15.4 визначає взаємодію двох нижніх рівнів моделі взаємодії: фізичного рівня (PHY) і рівня контролю доступу до радіоканалу для трьох діапазонів частот: 2,4 ГГц, 868 МГц і 915 МГц. В таблиці 1.2 наведені основні характеристики пристроїв, які працюють у цих діапазонах частот.

Таблиця 1.2.

Основні характеристики встаткування

Діапазон частот	Кількість каналів	Швидкість передачі даних	Тип модуляції
868 – 870 МГц	1	20Кбіт/с	BPSK
902 – 928 МГц	10	40Кбіт/с	BPSK
2.4 – 2.4835 МГц	16	250Кбіт/с	O-QPSK

Технологія бездротової передачі даних ZigBee, запропонована ZigBee Alliance, визначає рівні моделей взаємодії, включаючи мережевий рівень, рівень безпеки, рівень структури програми та рівень профілю програми.

Мережевий рівень технології бездротової передачі даних ZigBee відповідає за виявлення пристроїв і налаштування мережі. Він підтримує три варіанти топології мережі, зображені на (рис. 1.5). Передача даних у мережах на основі дерева використовує стратегію ієрархічної маршрутизації та може бути централізованою, вимагаючи регулярних маяків від координаторів фізичного рівня. Тому в таких мережах може бути використаний режим синхронізованого доступу та "сплячий" режим мережевих пристроїв, що дозволяє зменшити енергоспоживання.

Цей режим підтримується мережевими протоколами ZigBee. У таких мережах (рис. 1.5. а) пристрої "слухають" ефір і "розмовляють" з ефіром у певний час, "прив'язаний" до сигналів маяків. В інший час пристрої "сплять". Пристрій, який випромінює сигнали маяка, також може бути в "сплячому" режимі.

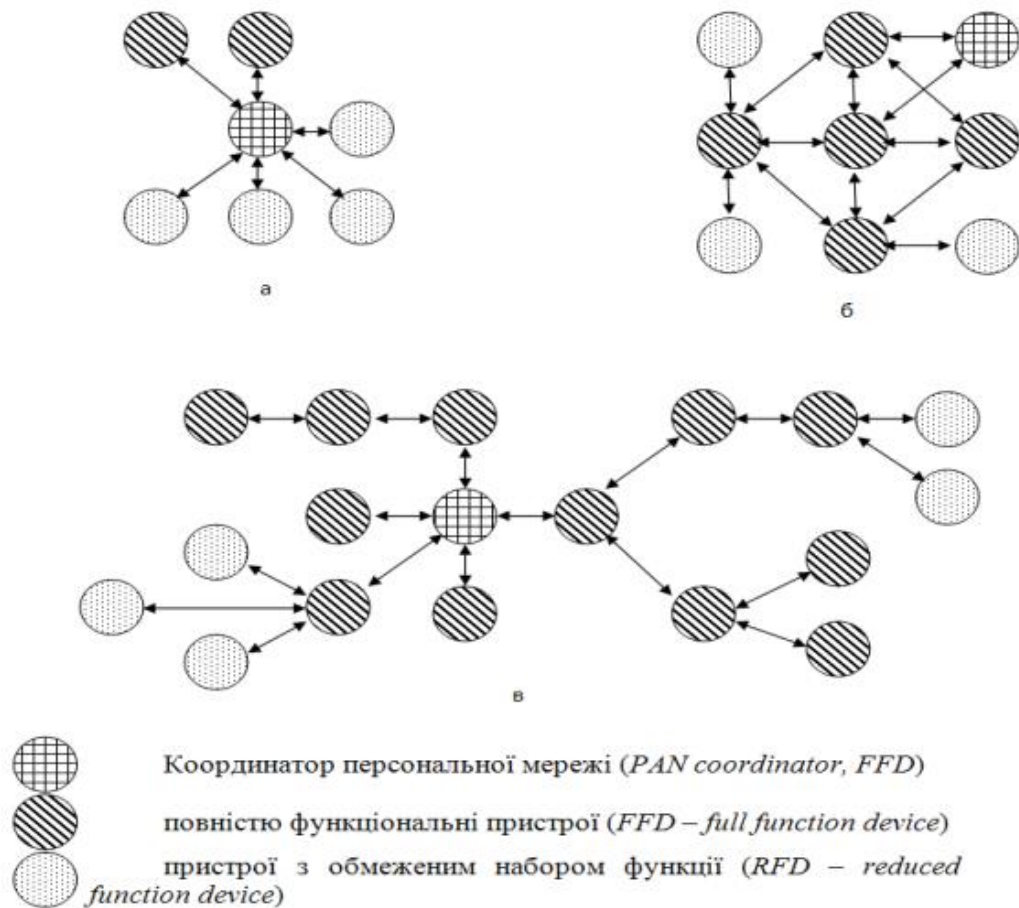


Рис. 1.5. Варіанти топології мережі ZigBee

Мережі з сітчастою топологією (рис. 1.5. б, в) переважно використовують асинхронну передачу даних, таких як команди включення та вимкнення в системах управління або дані від датчиків, що переходять у режими "пробудження" або "несплячості" у мережах датчиків. Вся мережа повинна бути "неактивною" і готовою передати ці дані адресату, такому як пристрій або точка збору інформації, у будь-який момент.

У таких мережах розподіл споживаної енергії між пристроями може бути несиметричним. Деякі пристрої постійно працюють, тоді як інші майже завжди перебувають у "сплячому" стані. Вихід з "сплячого режиму" цих пристроїв відбувається лише за серйозних зовнішніх причин.

Для забезпечення економічної інтеграції технології бездротової передачі ZigBee у різні галузі, фізична реалізація апаратної частини стандарту IEEE 802.15.4 доступна у двох варіантах: пристрої з обмеженою функціональністю (RFD) та повнофункціональні пристрої (FFD). При реалізації будь-якої з топологій мережі,

зображених на (рис. 1.5.), необхідно мати принаймні один пристрій FFD, який виконує роль координатора мережі (МК). У таблиці 1.3 наведений перелік функцій, які виконують пристрої FFD та RFD.

Таблиця 1.3.

Перелік функцій для RFD та FFD пристроїв

Пристрої з обмеженим набором функцій (RFD – <i>reduced function device</i> )	Повністю функціональні пристрої (FFD – <i>full function device</i> )
При об'єднанні RFD пристроїв може використовуватися тільки топологія «зірка»	При об'єднанні FFD пристроїв можуть використовуватися усі можливі топології: «зірка», «кожен з кожним», «кластерне дерево».
Не можуть виступати в ролі МК	Можуть виступати в ролі МК, забезпечуючи при цьому маршрутизацію повідомлень всередині мережі
Для обміну даними можуть встановлювати зв'язок тільки з МК (FFD пристроєм)	Обмін даними може проводитись з МК, іншим FFD пристроєм, чи RFD пристроєм.
Живляться, переважно, від вбудованої батареї	Живляться, переважно, від зовнішнього джерела

Крім розподілу пристроїв на категорії RFD і FFD, ZigBee Alliance встановлює три типи логічних пристроїв: координатор ZigBee (координуючий пристрій), маршрутизатор ZigBee і кінцевий пристрій ZigBee. Координатор ініціалізує мережу, керує вузлами та зберігає інформацію про конфігурацію кожного підключеного вузла.

Маршрутизатор ZigBee відповідає за пересилання повідомлень між вузлами у мережі. Кінцевий пристрій є будь-яким пристроєм, підключеним до мережі. Пристрої RFD і FFD, які були розглянуті раніше, є термінальними пристроями. Тип логічного пристрою, який використовується при побудові мережі, визначається кінцевим користувачем шляхом вибору конкретного профілю, запропонованого ZigBee Alliance.

Технологія ZigBee може бути впроваджена в різні системи для автоматизації житлових та комерційних приміщень, зокрема: системи автоматизації життєзабезпечення будинків і споруд (управління розетками, вимикачами, диммерами і т. д.); системи керування побутовою електронікою; системи автоматичного збору показників різних лічильників (газу, води, електроенергії тощо); системи безпеки (датчики диму, системи контролю доступу і безпеки, виявлення витоків газу та води, датчики руху тощо); системи моніторингу навколишнього середовища (датчики температури, тиску, вологості, вібрації тощо); системи промислової автоматизації.

### **Недоліки технології ZigBee:**

1. **Інтерференція в мережі.** Технологія ZigBee є дуже чутливою до інтерференції в мережі. Це стається через завантаження каналу та наявність інших мережевих пристроїв. Використання діапазону 2,4 ГГц, який також використовується Bluetooth, бездротовими телефонами, мікрохвильовими печами та іншими пристроями, призводить до збільшення ймовірності перешкод.

2. **Низька швидкість передачі.** Технологія ZigBee має обмежену швидкість передачі даних, оскільки її розроблено для передачі даних на низьких швидкостях. Це призводить до порівняно низької швидкості передачі порівняно з Bluetooth і WLAN.

3. **Проблеми з безпекою та сумісністю.** Технологія ZigBee включає в себе ризики для безпеки. Через свою вразливість до втрати зв'язку, зловмисні дії можуть призвести до втрати послуг, крадіжки даних або взлому вузла. Зловмисник може отримати доступ до вузла та його контролю в несанкціонованому режимі. Також виникають проблеми з сумісністю. Конкуренція з іншими бездротовими



технологіями, такими як Bluetooth і Wi-Fi, обмежує вибір користувачів. Це робить ZigBee несумісним з популярними пристроями, такими як смартфони, планшети, комп'ютери та ноутбуки.

## ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1

1. Wi-Fi (Wireless Fidelity) - це технологія, розроблена Асоціацією WECA на основі стандарту широкосмугової бездротової мережі IEEE 802.11. Метою створення Wi-Fi було замінити провідний Ethernet інтерфейс. Основний стандарт для налаштування бездротових локальних мереж (WLAN) - це IEEE 802.11. Він визначає протоколи для забезпечення зв'язку з пристроями, які підтримують Wi-Fi, такими як бездротові маршрутизатори і точки доступу. Мережа Wi-Fi складається з кількох робочих станцій, які підключаються одна до одної і можуть виконувати функції перемикання. Усі елементи мережі є рівноправними і мають багато з'єднань між собою.

2. Bluetooth (стандарт IEEE 802.15) - це перша технологія, яка дозволила організувати WPAN (бездротову персональну мережу). Вона забезпечує передачу даних і голосу на короткі відстані (10-100 м) в діапазоні частот 2,4 ГГц і дозволяє підключати ПК, мобільні телефони та інші пристрої без прямої видимості. Bluetooth і Wi-Fi використовують один і той же неліцензований діапазон 2,4 ГГц. Це може призводити до зіткнень, коли пристрої Bluetooth знаходяться в зоні дії бездротових пристроїв і обмінюються даними один з одним. Технологія AFH (Adaptive Frequency Hopping) використовує ступінчасту зміну частоти вибраного каналу для уникнення зіткнень з пристроями Wi-Fi, що використовуються для передачі даних.

3. Технологія бездротової передачі даних ZigBee з'явилася після випуску технологій Bluetooth і Wi-Fi. Вона була розроблена з урахуванням потреб деяких операцій, де головними критеріями є низьке енергоспоживання, простота апаратної частини і економічність. Технологія ZigBee використовується, наприклад, для дистанційного керування освітленням, гаражними дверима або зчитуванням інформації з датчиків.

## РОЗДІЛ 2

# ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LI-FI

### 2.1. Основи технології Li-Fi [13]

У липні 2011 року, під час виступу на TED Global, професор Гаральд Хаас вперше використовує термін "Li-Fi". Публічна демонстрація Li-Fi відбулася в той же час [13]. Компанія pureLiFi була заснована в січні 2012 року професором Гарольдом Хаасом і доктором Мостафою Афгані як дочірня компанія Единбурзького університету з метою виробництва компонентів Li-Fi, таких як драйвери та приймачі. Фахівці компанії активно проводять експерименти і дослідження в області Li-Fi з метою досягнення нових проривів. Вони вважають, що Li-Fi, стільниковий зв'язок і Wi-Fi можуть використовуватись одночасно для створення ще більш широкого спектру бездротових мереж.

Li-Fi - це система передачі бездротових даних через видиме світло, що використовує технологію видимого світла (VLC) [14]. Вона має високу пропускну здатність, швидкість передачі даних, низьку затримку та високий рівень безпеки, що задовольняє вимоги сучасних систем розумного дому. Технологія Li-Fi дозволяє системам розумного дому працювати легко, безпечно і надійно, уникаючи перешкод та забезпечуючи якісний зв'язок. Вона також знімає навантаження зі стрімкого потокового передавання даних і забезпечує швидке та надійне підключення. У контексті віртуальної, доповненої та змішаної реальності, технологія Li-Fi забезпечує вищу швидкість передачі даних, меншу затримку, безперешкодний бездротовий зв'язок і точну геолокацію. Крім домашнього використання, Li-Fi також знаходить попит на ринку для захищених пристроїв.

Згідно з рис. 2.1, технологія Li-Fi складається зі світлодіодної лампи для передачі медіа і фотодетектора як приймача переданих даних [14]. Для правильної роботи світлодіода необхідний драйвер лампи. Посилення та обробка сигналу, що надходить від фотодетектора, відповідають за управління сигналом.

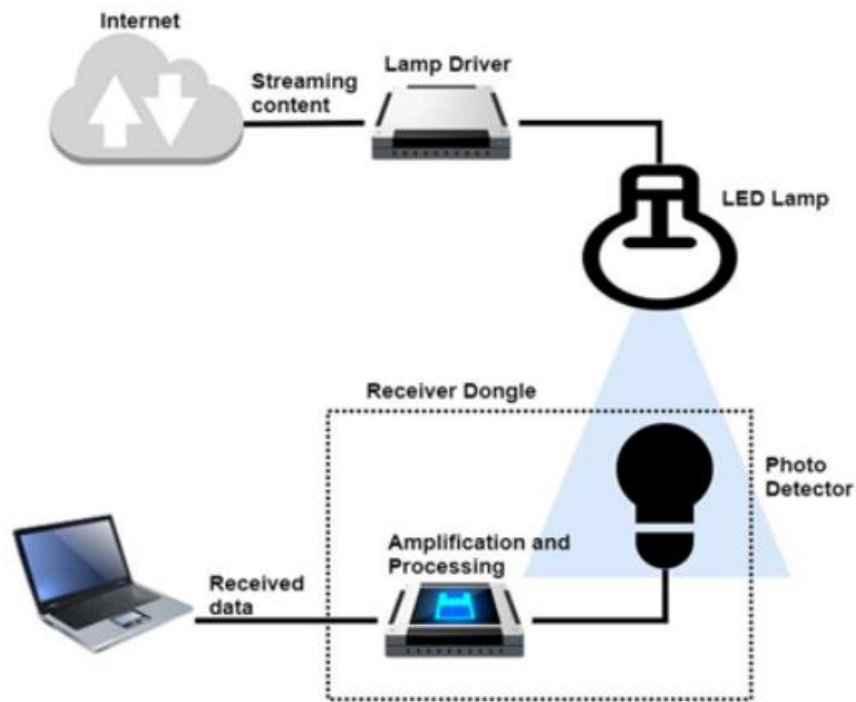


Рис. 2.1. Основна концепція діаграми Li-Fi

Фундаментальна ідея функціонального принципу технології Li-Fi полягає в наявності трансівера і використанні світла як засобу передачі медіа. Блок-схема базової концепції Li-Fi показана на рис. 2.2 [14]. Ця основна концепція передбачає можливість дуплексного зв'язку. За допомогою трьох стандартних лазерних діодів (червоного, зеленого та синього), швидкість Li-Fi становить 14 Гбіт/с, і використовуючи повний видимий спектр, ця технологія може досягати швидкості до 100 Гбіт/с.

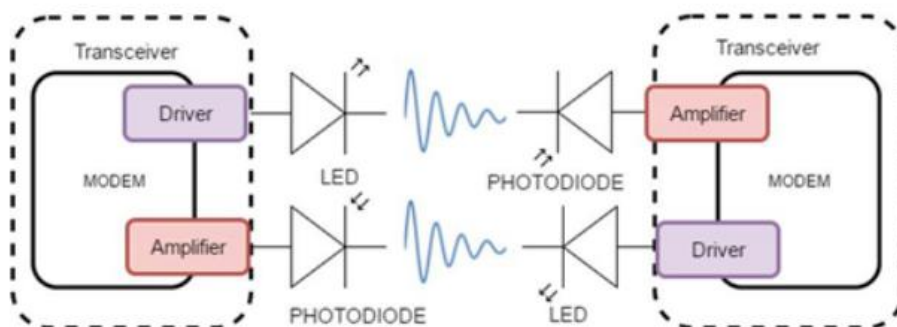


Рис. 2.2. Трансивер LiFi на основі VLC

Згідно з [14], технології Li-Fi та VLC використовують схоже середовище для передачі даних, яке є легким. Однак, вони відрізняються у тому, що VLC забезпечує однонаправлений зв'язок "точка-точка" з низькою швидкістю передачі даних. З іншого боку, Li-Fi є повноцінною мережевою технологією з двонаправленим і швидким бездротовим зв'язком.

## 2.2. Ключові особливості застосування технології Li-Fi [13], [14], [15]

Li-Fi представляє собою швидкий і більш доступний оптичний аналог Wi-Fi, який використовує видиме світло електромагнітного спектру (від 400 до 800 ТГц, див. рис. 2.3) як оптичний носій для передачі даних [14]. Основні компоненти базової системи Li-Fi включають яскравий білий світлодіод як джерело передачі даних і кремнієвий фотодіод, який добре реагує на видиме світло, як приймальний елемент.

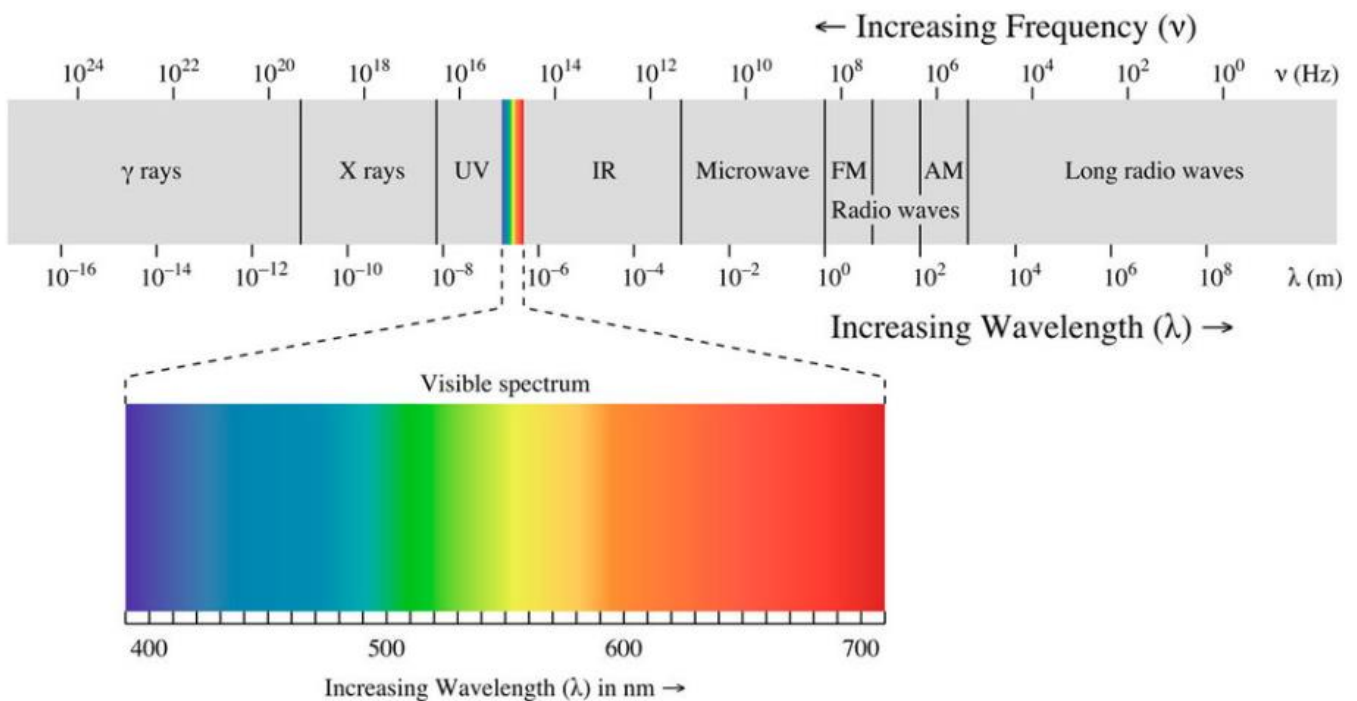


Рис. 2.3. Електромагнітний спектр

Світлодіодні лампи можуть миготіти на дуже високих швидкостях, які не сприймаються людським оком [13]. Під час коротких імпульсів, коли світлодіодні лампи швидко вимикаються, приймач перетворює цей сигнал на електричний сигнал.

Потім цей сигнал знову перетворюється на послідовні двійкові дані, які отримуємо на наших пристроях з доступом до Інтернету у вигляді веб-, відео- та аудіофайлів (див. рис. 2.4.) [15].

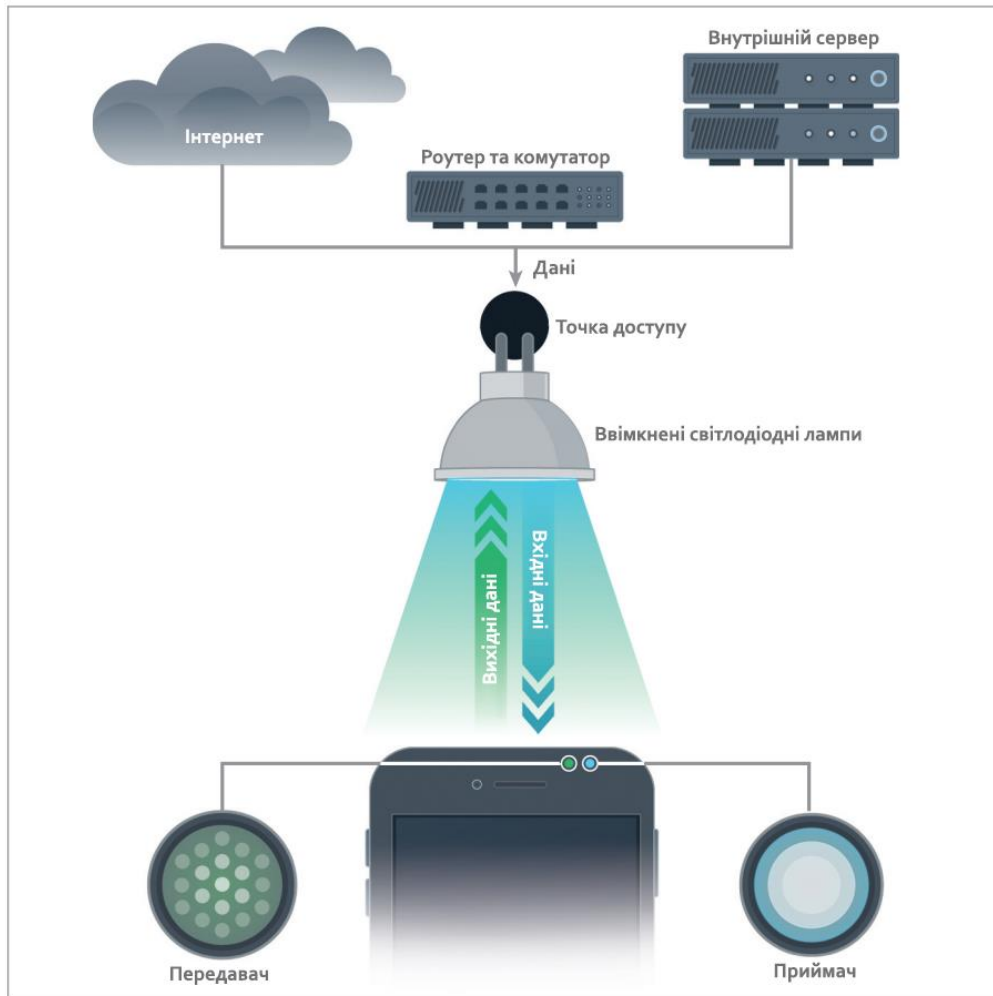


Рис. 2.4. Принцип роботи технології Li-Fi

Лампи Li-Fi мають вбудований чіп, який слабо модулює світло для оптичної передачі. Дані передаються за допомогою побутових світлодіодних (LED) ламп і приймаються фоторецепторами. Впровадження системи Li-Fi може забезпечити швидкість передачі, яка перевищує швидкість традиційного Wi-Fi, що працює на радіохвилях, близько в 100 разів (тобто швидкість може сягати понад 1 Гбіт/с) [15].

Однією з відмінних особливостей Li-Fi є те, що ця система не створює перешкод для радіосигналів, на відміну від Wi-Fi, що робить її більш стабільною для забезпечення швидкості Інтернету. Це особливо важливо, не зважаючи на значну

різницю в швидкостях між двома порівнюваними типами мереж. Крім того, технологія Li-Fi є більш безпечною та забезпечує додаткову конфіденційність, оскільки світло блокується стінами, що забезпечує безпечнішу передачу даних (див. рис. 2.5.).



Рис. 2.5. Порівняння з технологією Wi-Fi

При використанні Wi-Fi мережа стає вразливою до хакерських атак через свій великий радіус дії, а також тому, що високочастотний сигнал не блокується стінами [13]. З іншого боку, діапазон покриття Li-Fi обмежений 10 метрами, в той час як Wi-Fi має здатність охоплювати до 32 метрів, що робить Wi-Fi більш широко використовуваною мережею. Крім того, технологію Li-Fi не можна використовувати на відкритому повітрі під сонячним світлом або в нестабільних умовах, а також вона не може працювати без світлодіодних ламп в темряві [13].

### **2.3. Область застосування Li-Fi [14] , [16]**

Технологія Li-Fi має потенціал замінити Wi-Fi та інші радіочастотні методи зв'язку у багатьох випадках [16]. Використання Li-Fi може бути безпечною альтернативою у деяких ситуаціях, а в інших вона може бути єдиним високошвидкісним способом зв'язку. Ось декілька ситуацій, в яких можна використовувати Li-Fi [16]:

- У лікарнях: Завдяки тому, що Li-Fi не заважає пристроям, що працюють на радіочастотах, його можна безпечно використовувати в лікарнях. Наприклад, в коридорах, кімнатах очікування, пацієнтських кімнатах та операційних, технологія Li-Fi дозволить створити комунікаційну мережу, що усуне проблеми електромагнітних перешкод від смартфонів, пов'язаних з використанням Wi-Fi в лікарнях. Li-Fi також може використовуватись для моніторингу руху пацієнта та важливих показників у режимі реального часу без потреби в кабелях.

- В аеропортах: Використання системи Li-Fi в аеропортах є дуже ефективним. Як і у лікарнях, система не впливає на роботу пристроїв, що працюють на радіочастотах, і не завдає шкоди основним зв'язковим системам літаків та метеостанцій, що дозволяє аеропорту працювати без перешкод.

- На літаках: У літаках використання Wi-Fi є рідкісним через вплив електромагнітних радіохвиль від роутерів на роботу пристроїв та зв'язок з контролерами. У цьому випадку використання Li-Fi є надзвичайно ефективним.

- У офісах і школах: Система Li-Fi пропонує найбезпечніше з'єднання з точки зору інформаційної безпеки порівняно з усіма іншими доступними сьогодні системами. Крім освітлення, система також може забезпечувати доступ до Інтернету, не проникаючи через стіни, що робить підключення до локальної мережі максимально безпечним.

Підводне інтернет-з'єднання (див. рис. 2.6.) є ще однією галуззю, де можна використовувати цю технологію, завдяки принциповим відмінностям між Wi-Fi і Li-Fi.

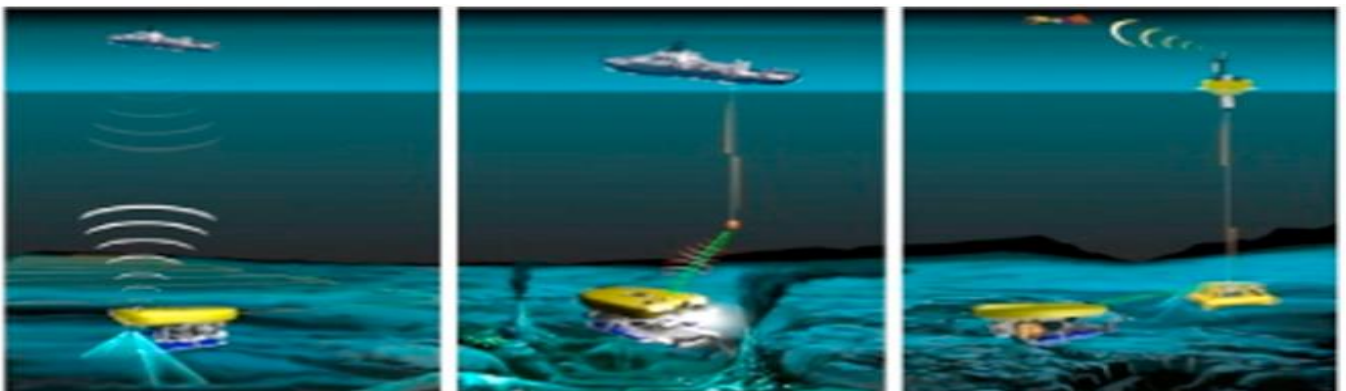


Рис. 2.6. Візуалізація підводного інтернет-з'єднання

Отже, таку систему зв'язку можна успішно використовувати через світловий канал [14] у наступних ситуаціях:

- На підводних човнах, де можна передавати дані між двома човнами та виявляти перешкоди на шляху.
- Для забезпечення безпеки приватних і комерційних рибальських суден, де можна використовувати цю технологію як додатковий засіб зв'язку, щоб надсилати повідомлення іншому судну або центральному органу влади у разі виявлення проблеми в морі або на борту судна.
- У рятувальних операціях на морі, де інформацію можна передавати між суднами.
- Під час патрулювання, коли невідоме судно перебуває в морі, патрульний корабель може надсилати інформацію до центрального органу влади.
- Для бездротового дистанційного керування підводними апаратами.

#### **2.4. Архітектура та Стандарти Li-Fi [13] , [14]**

Li-Fi використовує протоколи, подібні до IEEE 802.11, які використовуються в Wi-Fi, але замість радіохвиль використовує хвилі видимого світла в електромагнітному спектрі, що дозволяє отримати значно більшу пропускну здатність [13].

Стандарт для Li-Fi, IEEE 802.15.7, описує фізичний та середній рівень контролю доступу, які складаються з трьох окремих фізичних рівнів (PHY I, II і III) з різною пропускну здатністю [14]. На рис. 2.7. показана багаторівнева архітектура Li-Fi.

В багаторівневій архітектурі Li-Fi відрізняється трьома рівнями: рівень додатків, рівень MAC і фізичний рівень. IEEE 802.15.7 визначає лише два стандарти - рівень PHY і MAC [14].



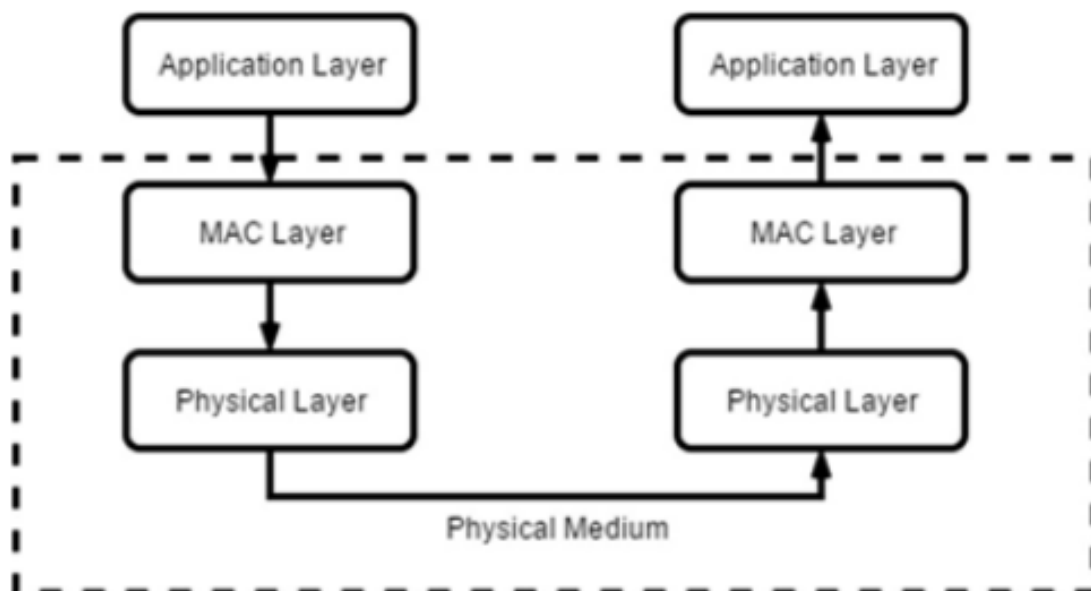


Рис. 2.7. Багаторівнева архітектура VLC

РНУ I призначений для використання на відкритому просторі і має діапазон швидкостей передачі даних від 11,67 Кбіт/с до 267,6 Кбіт/с, тоді як РНУ II пропонує швидкість передачі даних від 1,25 Мбіт/с до 96 Мбіт/с.

РНУ III, розроблений для багатьох джерел, використовує унікальний метод модуляції під назвою Color Shift Keying (CSK), також відомий як Wavelength Shift Keying, з швидкістю передачі даних від 12 Мбіт/с до 96 Мбіт/с.

На рівні MAC визначено три топології мережі: однорангова, зіркова та ширококомвна [14].

- У одноранговій топології два пристрої взаємодіють між собою, один з них виступає в ролі координатора.
- У зірковій топології зв'язок відбувається між декількома пристроями, при цьому один з них діє як координатор і виконує роль інфраструктури освітлення.
- У ширококомвній топології один пристрій, який є координатором, передає дані на кілька пристроїв, при цьому зв'язок є одностороннім.

## 2.5. Продуктивність Li-Fi

Таблиця 2.1.

Швидкість і стандарти Wi-Fi

Стандарт	Дата випуску	Максимальна швидкість
802.11b	1999	11 Mbps
802.11a	1999	54 Mbps
802.11g	2002	54 Mbps
802.11n	2007	72-600 Mbps
802.11ac	2013	433 Mbps – 1.3 Gbps

Таблиця 2.2.

Швидкість Li-Fi

№	Модуляція	Максимальна швидкість
1	OOK	803 Mbps
2	OFDM	2.1 Gbps
3	DMT	3.4 Gbps
4	PPM	30 Mbps
5	PAM	20 Mbps

Таблиця 2.3.

Різниця між LiFi і WiFi

Параметр	Li-Fi	Wi-Fi
Передавач	Світлодіодний (LED)	Антенa
Приймач	Світлодіодний (LED)	Антенa
Середня швидкість роботи	Більше 10 Gbps	150-600 Mbps
Діапазон частот	400-800 THz	2.4 GHz
Стандарт	IEEE 802.15	IEEE 802.11
Кількість користувачів	Залежить від кількості ламп	Залежить від точки доступу.
Передача даних	Біти	Радіохвилі
Зона покриття	10-15 метрів	20–100 метрів залежить від типу потужності передачі та антени
Завади	Відсутність проблем із радіочастотними хвилями	Перешкоди сусіднім маршрутизаторам AP

Топологія	Від точки до точки (PtP)	Точка на багатоточку(PtM)
Комунікація	На основі комунікації у видимому світлі	На основі радіочастотного зв'язку
Ефективність	Світлодіоди споживають менше енергії та мають високу ефективність	Базові радіостанції споживають велику кількість енергії
Доступність	Будь-де, доступний у літаку та під водою	Обмежена
Захист	Більш безпечний, тому що світлові хвилі не можуть проникати крізь стіни і не можуть бути перехоплені будь-ким за межами світлодіодного освітлення	Менш безпечний через високу проникаючу здатність радіохвиль, будь-хто може перехопити
Споживання енергії	Менше	Більше
Вплив на навколишнє середовище	Низьке	Середнє

## 2.6. Недоліки та переваги Li-Fi [17]

### Серед переваг [17] можна виділити:

- Забезпечується захищена передача даних, оскільки зловмисники повинні перехопити прямий промінь світла, що не завжди є можливим.
- Ця технологія є економічно вигідною та надійною. Навіть якщо планується додаткове обладнання для прийому/передачі даних у світильниках, ці витрати можна компенсувати завдяки економії електроенергії та уникненню необхідності в додаткових кабельних лініях.
- Не має негативного впливу на здоров'я людини. Світлодіодне освітлення не шкодить здоров'ю, в той час як негативний вплив радіохвиль підтверджений науковими дослідженнями.
- Видиме світло не взаємодіє з іншими електромагнітними частотами, що дозволяє використовувати технологію Li-Fi, наприклад, на борту літака або в медичних установах.

### **До недоліків можна віднести [17]:**

- Потреба в прямому каналі передачі. У відмінність від радіохвиль, які проникають через стіни, джерело світла обмежене своєю видимістю. Наприклад, для забезпечення рівномірного покриття мережі в квартирі потрібно встановлювати дублюючі або релейні світильники в кожній кімнаті. У разі використання технології на дорогах погані погодні умови, зокрема сніг або туман, можуть перешкоджати передачі даних.

- Відстань має значення. Максимальна швидкість передачі даних може бути досягнута лише у безпосередній близькості до джерела світла. Збільшуючи відстань від джерела, швидкість передачі даних нелінійно зменшується.

- Відсутність потужного джерела світла у портативних пристроях. Для забезпечення якісного двостороннього зв'язку обидва пристрої повинні мати потужне джерело світла. Це призводить до обмежень у застосуванні технологій у мобільних пристроях.

## **ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2**

1. Вперше представлений професором Гаральдом Хаасом на TED Global Talk у липні 2011 року, LiFi, відомий як Light Fidelity, використовує світлодіоди (LED) для створення повноцінної бездротової системи зв'язку. Ця технологія, основана на візуальному світловому зв'язку (VLC), дозволяє пристроям підключатися до Інтернету без використання проводів. Щоб забезпечити зв'язок між вузлами, LiFi використовує трансивер, який передає та отримує дані. Цей трансивер використовує технологію модуляції, що дозволяє передавати дані за допомогою світлодіодних ламп. Основною метою появи LiFi є подолання обмежень сучасних технологій.

2. Li-Fi (Light Fidelity) - це технологія бездротової передачі даних, яка використовує інфрачервоний та видимий спектр світла як канал зв'язку для швидкої передачі даних. Ця двонаправлена технологія, яка може функціонувати під водою, відноситься до комунікацій у видимому світлі (VLC).

3. Технологія Li-Fi здатна замінити Wi-Fi та інші радіочастотні методи зв'язку у багатьох ситуаціях. Вона є безпечною альтернативою в деяких випадках і єдиним високошвидкісним засобом зв'язку в інших. Тому Li-Fi можна успішно використовувати в таких випадках, як лікарні, аеропорти, літаки, офіси та школи.

4. Li-Fi використовує протоколи, схожі на IEEE 802.11 (Wi-Fi), але передає дані за допомогою хвиль видимого світла в електромагнітному спектрі, що забезпечує значно ширшу пропускну здатність. Стандарт для Li-Fi, IEEE 802.15.7, визначає фізичний та середній рівні контролю доступу, включаючи три окремі фізичні рівні (PHY I, II і III) з різною пропускну здатністю. IEEE 802.15.7 визначає два стандарти: рівень PHY та рівень MAC.

## РОЗДІЛ 3

### АПАРАТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ARDUINO ТА ТЕХНОЛОГІЇ LI-FI

#### 3.1. Апаратура Arduino [18]

Платформа Arduino надає зручність у створенні програмного забезпечення для готових вбудованих систем [18]. У середині цього пристрою міститься обчислювальне середовище, мова програмування та спеціальні плати з програмованими інструментами, що дозволяють створювати власні програми (див. Рис. 3.1).

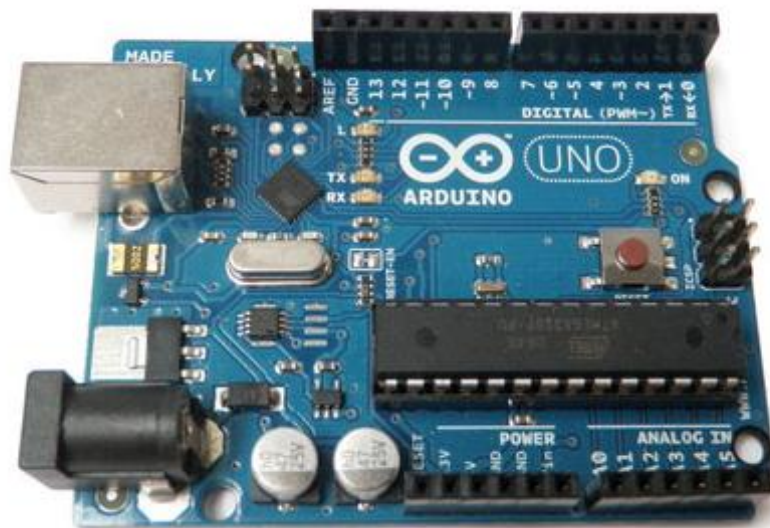


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд Arduino

Arduino використовує мікроконтролери з родини Atmega в якості свого "мозку" (див. Рис. 3.2). Мікроконтролер - це мікропроцесор, який включає в себе пам'ять та різноманітні периферійні пристрої, і розташований на одному чіпі. Це, по суті, єдиний мікрокомп'ютер, здатний виконувати прості завдання. Різні моделі Arduino використовують різні мікроконтролери з колекції Atmega [19].

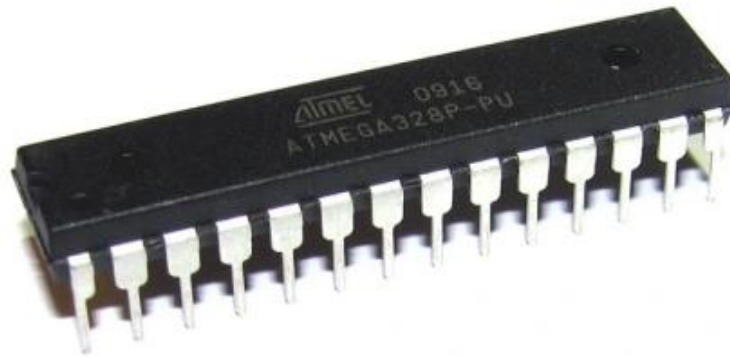


Рис 3.2. Мікроконтроллер Atmega328

В Arduino використовуються "руки" (позначені стрілками) [19]. В даному випадку стрілки виконують роль електричних роз'ємів, розташованих по периметру плати Arduino. Існують плати з різною кількістю виходів - деякі мають багато виходів, інші - менше. Наприклад, Arduino Mega, яка є найбільшою платою в сімействі Arduino, має понад 70 незалежних контактів, у той час як Arduino Pro Mini, яка є найменшою, має лише 22 контакти (див. Рис. 3.3.).



Рис. 3.3. Порівняння Arduino Mega і Arduino Pro Mini

### ***3.1.1. Цифрові та аналогові виводи [19]***

Контакти Arduino не є однаковими, оскільки вони поділяються на цифрові виходи і аналогові виходи. Основна різниця полягає в тому, що цифрові виходи можуть мати тільки два стани: логічну "1" (HIGH) з напругою від 3 до 5 вольт або логічну "0" (LOW) з напругою від 0 до 1,5 вольт. З іншого боку, аналогові виходи мають широкий діапазон значень, який розтягується від логічної 1 до 0 і поділяється на безліч малих діапазонів [19].

### ***3.1.2. Чим може керувати Arduino [19]***

Враховуючи велику кількість "рук" у Arduino, можливо підключити різноманітну периферію [19]. Серед доступних опцій, зокрема:

- Кнопки
- Світлодіоди
- Мікрофони та динаміки
- Електродвигуни та сервоприводи
- LCD дисплеї
- Зчитувачі радіочастотних міток (RFID та NFC)
- Ультразвукові та лазерні дальні міри
- Модулі Bluetooth, WiFi та Ethernet
- Зчитувачі SD-карт
- GPS та GSM модулі.

Також, є десятки різних датчиків, включаючи:

- Датчики освітлення
- Датчики магнітного поля
- Гіроскопи та акселерометри
- Датчики диму та складу повітря
- Датчики температури та вологості, а також багато інших.

## **3.2. Побудова приймальної та передавальної частини Li-Fi на основі плати Arduino [20]**



### Необхідні компоненти [20]:

1. Плата Arduino Uno.
2. Плата Arduino Nano.
3. Фоторезистор (LDR).
4. Клавіатура (Keypad) 4x4.
5. РК-дисплей 16x2 з модулем інтерфейсу I2C для нього.
6. Світлодіод 5 мм.
7. Макетна плата.
8. З'єднувальні дроти.

#### 3.2.1. Передавальна частина Li-Fi на основі плати Arduino [20]

На рис. 3.4 показано, як у пристрої введення інформації використовується клавіатура (клавіатура) 4x4. Інформація з клавіатури надходить на керуючий пристрій (контролер), роль якого виконує плата Arduino Nano [20]. Ця плата перетворює отриману з клавіатури інформацію в бінарні (двійкові) імпульси, які подаються на світлодіод для подальшої передачі у вигляді світлових імпульсів (рис. 3.5).

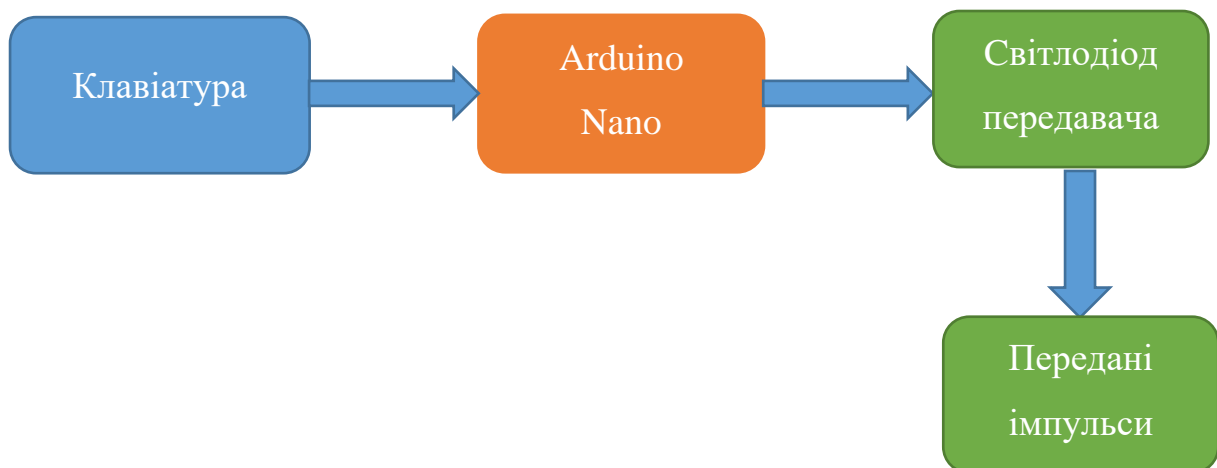


Рис. 3.4. Структурна схема передавальної частини передачі Li-Fi на основі плати Arduino

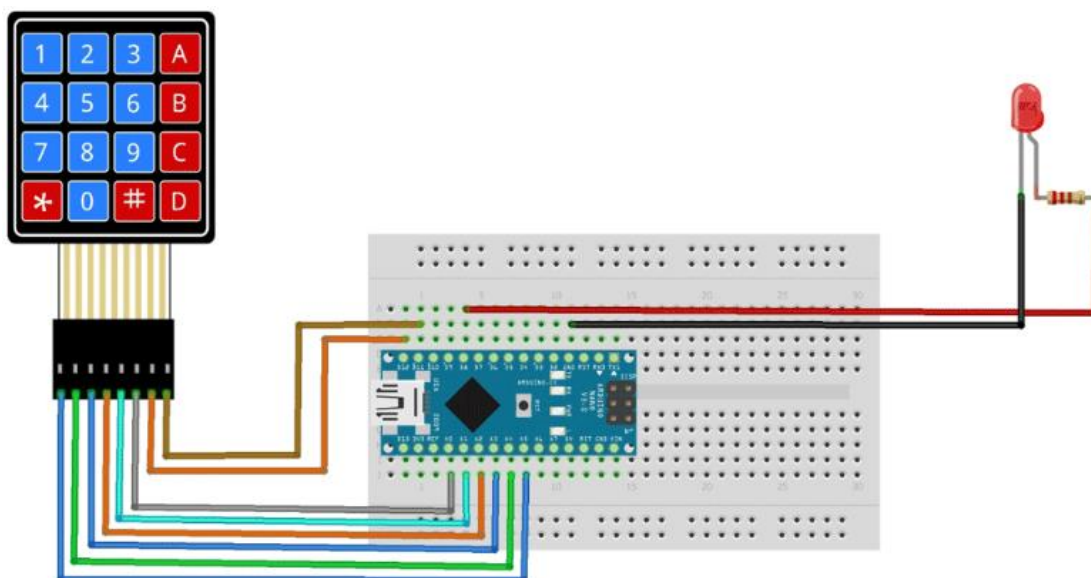


Рис. 3.5. Схема передавальної частини передачі Li-Fi на основі плати Arduino

### 3.2.2. Приймальна частина Li-Fi на основі плати Arduino [20]

На приймальній стороні фоторезистор (LDR) приймає імпульси світла з боку передачі і перетворює їх в електричні імпульси, які потім подаються на плату Arduino Uno [20]. Плата Arduino відображає отримані дані на рідкокристалічному екрані 16x2. (Рис. 3.6.)



Рис. 3.6. Структурна схема приймальної частини передачі Li-Fi на основі плати Arduino

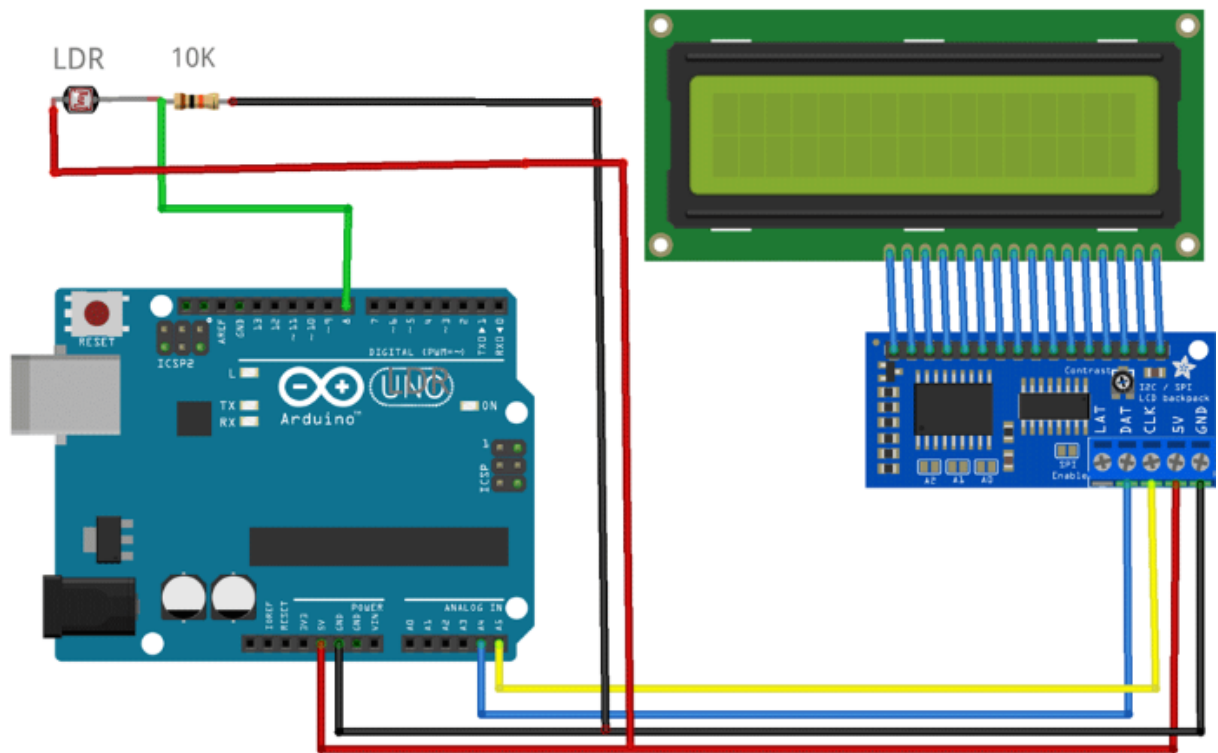


Рис. 3.7. Схема приймальної частини передачі Li-Fi на основі плати Arduino

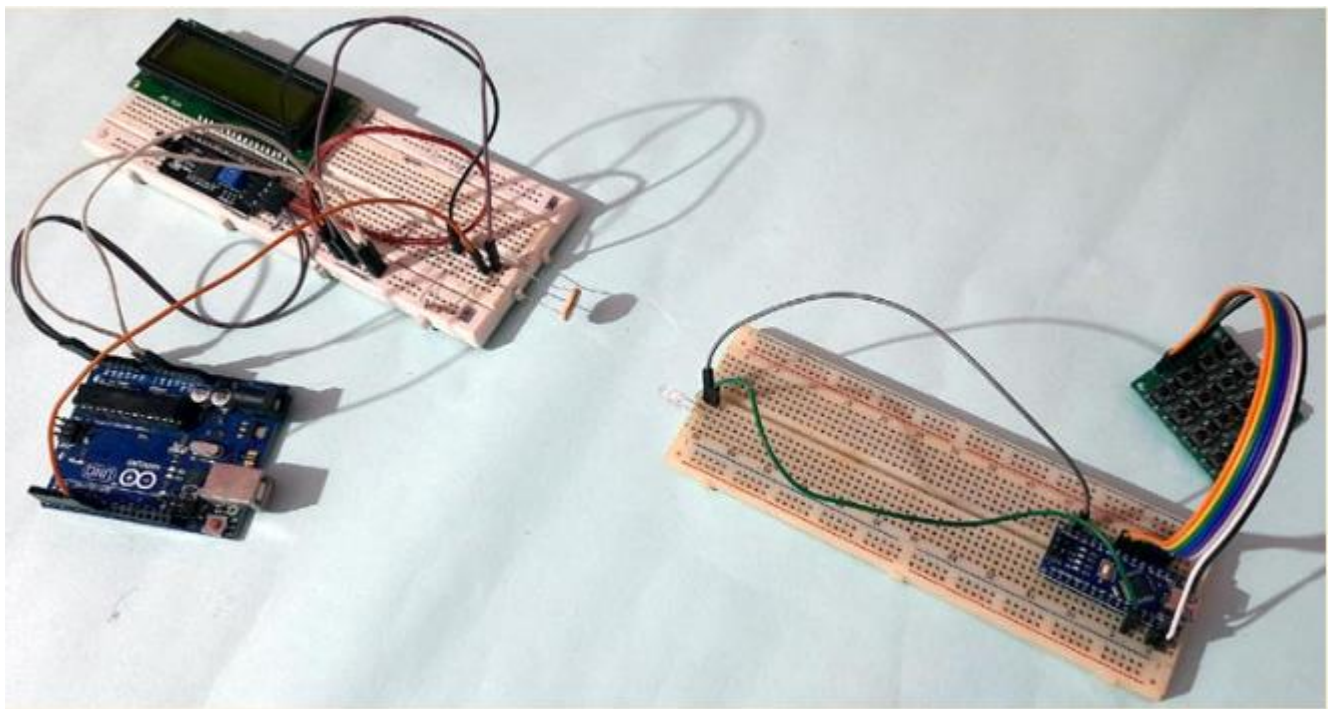


Рис. 3.8. Зовнішній вигляд зібраних макетних плат конструкції передавальної та приймальної частини

### 3.3. Написання програми для Arduino

В наступних пунктах розглянуто коротко його основні фрагменти (повний код програми наведено в Додатку А та Додатку Б). Розглянуто послідовно фрагменти коду для передавальної та приймальної частини.

#### 3.3.1. Програма для передавальної частини Li-Fi [20]

У передавальній частині плата Arduino Nano взаємодіє з клавіатурою 4x4 і світлодіодом [20]. Спочатку підключаємо бібліотеку для роботи з клавіатурою 4x4:

```
#include <Keypad.h>
```

Після успішної інсталяції бібліотеки вказуємо кількість стовпців і кількість рядків використовуваної клавіатури:

```
1 const byte ROW = 4;  
2 const byte COL = 4;  
3 char keyscodes[ROW][COL] = {  
4  {'1', '2', '3', 'A'},  
5  {'4', '5', '6', 'B'},  
6  {'7', '8', '9', 'C'},  
7  {'*', '0', '#', 'D'}  
8};
```

Далі вказуємо, до яких контактів плати Arduino Nano підключені контакти рядків і стовпців клавіатури. У моєму випадку ми використовуємо контакти A5, A4, A3 і A2 для підключення до контактів R1, R2, R3, R4 клавіатури та контакти A1, A0, 12, 11 для підключення до контактів C1, C2, C3 і C4 клавіатури. .

```
1 byte rowPin[ROW] = {A5, A4, A3, A2};  
2 byte colPin[COL] = {A1, A0, 12, 11};  
3 Keypad customKeypad = Keypad( makeKeymap(keyscodes), rowPin, colPin, ROW, COL);
```

У середині функції `setup()` для контакту 8 (до якого підключено світлодіод) встановлюється в режим виведення, а потім подається низька напруга (світлодіод вимкнено).

```
1 void setup()
2 {
3   pinMode(8,OUTPUT);
4   digitalWrite(8,LOW);
5 }
```

У функції `loop`, за допомогою функції `customKeypad.getKey()` відбувається зчитування значень, і, крім того, формуються умови за допомогою операторів `if`, які дозволяють сформувавши унікальний набір світлових імпульсів для кожної натиснутої клавіші [20]. Для створення унікальних імпульсів ми використовуємо різні часові інтервали дії імпульсів.

```
1 char customKey = customKeypad.getKey();
2 if (customKey) {
3   if (customKey == '1')
4   {
5     digitalWrite(8,HIGH);
6     delay(10);
7     digitalWrite(8,LOW);
8   }
```

### 3.3.2. Програма для приймальної частини Li-Fi [20]

На приймальній стороні до плати Arduino Uno підключені фоторезистор і РК-дисплей. Фоторезистор з'єднаний послідовно зі звичайним резистором, тому вони утворюють схему дільника напруги [20]. Аналогова напруга з виходу дільника напруги подається на плату Arduino як вхідний сигнал. У проекті використовується модуль інтерфейсу I2C для підключення РК-дисплея, щоб зменшити кількість контактів плати Arduino, які використовуються для підключення РК-дисплея - у моєму випадку ми використовуємо лише 2 контакти для передачі даних (SCL/SDA) і 2 контакти для джерела живлення [20].

Спочатку в програмі необхідно підключити використовувані бібліотеки: Wire.h для зв'язку з інтерфейсом I2C, LiquidCrystal\_I2C.h - для управління РК-дисплеєм через інтерфейс I2C.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

Для керування РК-дисплеєм за допомогою модуля I2C ми вводимо об'єкт класу LiquidCrystal\_I2C. Для цього об'єкта потрібно вказати адресу, кількість стовпців і рядків відображення: 0x3f, 16, 2.

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f, 16, 2);
```

У середині функції setup() ми встановлюємо режим роботи для контакту, з якого будемо читати отриманий сигнал. Ми також показуємо вітальне повідомлення на екрані.

```
1 void setup()
2 {
3   pinMode(8, INPUT);
4   Serial.begin(9600);
5   lcd.init();
6   lcd.backlight();
7   lcd.setCursor(0, 0);
8   lcd.print("  WELCOME TO  ");
9   lcd.setCursor(0, 1);
10  lcd.print("  CIRCUIT DIGEST  ");
11  delay(2000);
12  lcd.clear();
13 }
```

У середині функції циклу тривалість імпульсу, що надходить від фоторезистора, визначається за допомогою функції pulseIn. У цьому випадку тип імпульсу НИЗЬКИЙ. Значення тривалості імпульсу відображається у вікні монітора послідовного зв'язку для цілей налагодження [20].



```
1 unsigned long duration = pulseIn(8, HIGH);  
2 Serial.println(duration);
```

У нас є 16 різної тривалості імпульсу (кількість клавіш на нашій клавіатурі). Порівнюючи тривалість отриманого імпульсу з різними часовими інтервалами (можливими діапазонами тривалості імпульсу), можна визначити, який символ було надіслано [20]. У цьому випадку фрагмент коду отримання ключа 1 виглядає так:

```
1 if (duration > 10000 && duration < 17000)  
2 {  
3   lcd.setCursor(0, 0);  
4   lcd.print("Received: 1   ");  
5 }
```

### 3.4. Тестування виконаної роботи [20]

Після складання апаратної частини проєкту та завантаження програмних кодів на обидві плати Arduino можна приступати до тестування проєкту. Натискаємо будь-яку клавішу на клавіатурі в передавальній частині (рис. 3.10.) і бачимо, як натиснуті символи (клавіші) відображаються на рідкокристалічному дисплеї 16x2 в приймальній частині (рис. 3.11.) [20].

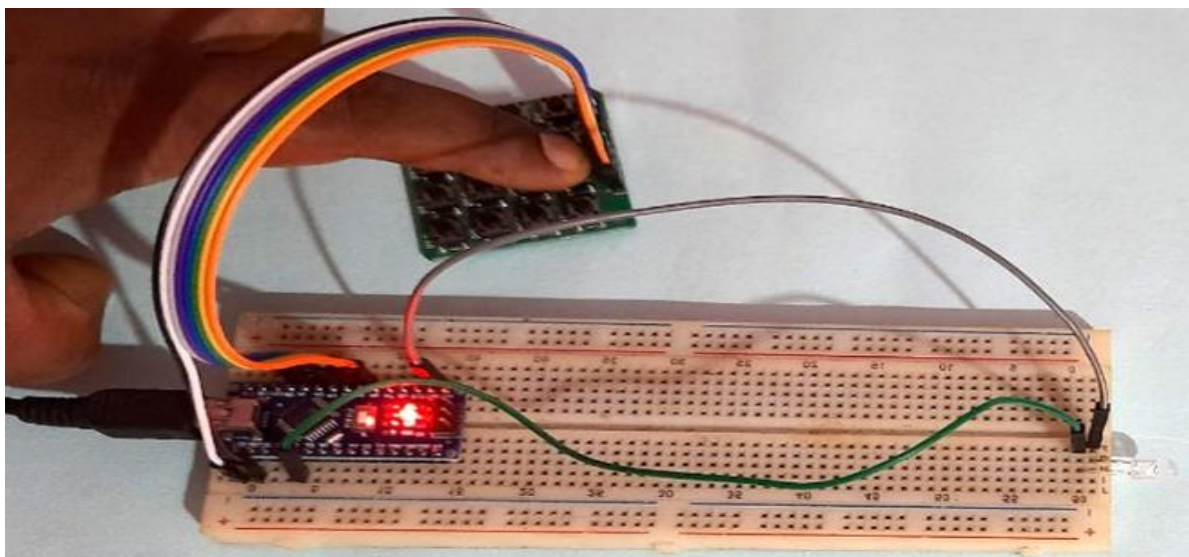


Рис. 3.10. Натискання клавіші на клавіатурі в передавальній частині

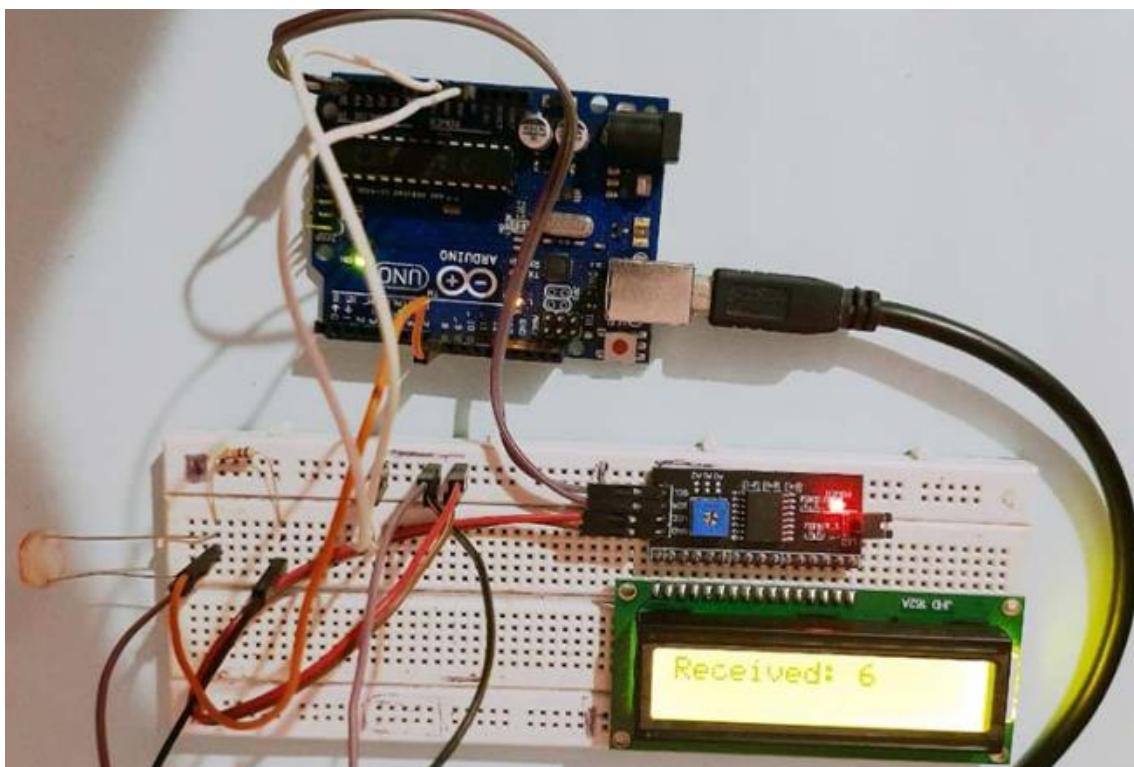


Рис. 3.11. Результати натискання в приймальній частині

### ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3

1. Arduino — це невеликий електронний пристрій, що складається з однієї плати, який може керувати різними датчиками, електродвигунами, освітленням, надсиланням і отриманням даних тощо. Arduino — це ціле сімейство пристроїв різних розмірів і можливостей.

2. Визначено необхідні компоненти для реалізації передачі даних за технологією Arduino та Li-Fi

3. Зібрано приймальну частину Li-Fi на основі Arduino Nano;

4. Зібрано передавальну частину Li-Fi на основі Arduino Uno;

5. Написаний програмний код для приймальної частини;

6. Написаний програмний код для передавальної частини;

7. Код протестовано.



## ВИСНОВКИ

1. Технологія Wi-Fi застосовується для бездротових локальних мереж, доступу до Інтернету, передачі великих файлів, мультимедійних об'єктів та відео, серед іншого.

2. Технологія Bluetooth використовується у телекомунікаціях для передачі невеликих файлів і аудіопотоків, з'єднання двох або більше пристроїв та надання каналів інформації без дротових з'єднань.

3. Технологія ZigBee знаходить застосування в бездротових сенсорних мережах, автоматизації житлових і будівельних комплексів, створенні індивідуальних діагностичних медичних пристроїв, промислового моніторингу і контролі, побутовій електроніці та периферії ПК.

4. Li-Fi (Light Fidelity) — це технологія бездротової передачі даних, яка використовує інфрачервоний та видимий спектр світла як канал зв'язку для високошвидкісної передачі даних. Li-Fi є двонаправленою технологією, яку можна використовувати під водою і відноситься до комунікацій у видимому світлі (VLC).

5. Технологія Li-Fi, у більшості випадків, може замінити Wi-Fi та інші радіочастотні методи зв'язку. В різних ситуаціях використання Li-Fi може бути безпечнішою альтернативою або єдиним високошвидкісним засобом зв'язку. Таким чином, Li-Fi можна використовувати, наприклад:

- У лікарнях
- В аеропортах
- На літаках
- У офісах і школах

6. Технологія Li-Fi використовує протоколи, аналогічні IEEE 802.11 (Wi-Fi), але передає дані за допомогою видимого світла (замість радіохвиль) у електромагнітному спектрі, що дозволяє забезпечити значно ширшу пропускну здатність. Стандарт для Li-Fi, IEEE 802.15.7, описує фізичний та середній рівні контролю доступу, які включають три окремі фізичні рівні (PHY I, II і III) з різною

пропускною здатністю. IEEE 802.15.7 встановлює два стандарти: рівень PHY і рівень MAC.

7. Arduino — це невеликий електронний пристрій, що складається з однієї плати, який може керувати різними датчиками, електродвигунами, освітленням, надсиланням і отриманням даних тощо. Arduino — це ціле сімейство пристроїв різних розмірів і можливостей.

8. В ході виконання проєкту, було реалізовано передачу даних за допомогою технологій Li-Fi та Arduino, а саме:

- Визначено необхідні компоненти;
- Зібрано приймальну частину Li-Fi на основі Arduino Nano;
- Зібрано передавальну частину Li-Fi на основі Arduino Uno;
- Написання коду програми для приймальної частини;
- Написання коду програми для передавальної частини;
- Проведення тестування коду.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003), Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Specifications.
2. IEEE Std 802.11a-1999 (Reaff 2003), Supplement to IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks— Specific requirements.
3. IEEE Std 802.11b-1999, Supplement to IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks— Specific requirements.
4. IEEE Std 802.11g-2004, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements— Specifications.
5. IEEE Std 802.11i-2004, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements.
6. IEEE Std 802.11n-2009, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks.
7. Hunko M.A., Tkachov V.M. Development of a module for sorting the ipaddresses of user nodes in cloud firewall protection of web resources. Дев'ята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно комунікаційних технологій та засобів управління». 2019.
8. IEEE Std 802.15.1-2002, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements.
9. Definition of Bluetooth versions. *PCMAG*. URL: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/bluetooth-versions>

10. What Is Bluetooth? Different bluetooth versions, features explained. *Onsitego Blog | Consumer electronics news, buying guides, and reviews*. URL: <https://onsitego.com/blog/bluetooth-explained-versions-compared-features-specifications/>
11. Definition of 6LoWPAN. *PCMAG*. URL: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/6lowpan>
12. IEEE 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003
13. LiFi technology | advantages of lifi. *PureLifi*. URL: <https://www.purelifi.com/about-lifi/>
14. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges – DOAJ. *Directory of Open Access Journals – DOAJ*. URL: <https://doaj.org/article/b52fc589a6a04fe58765b6fd45aec82>
15. LiFi Technology – LiFi. *LiFi*. URL: <https://www.lifitn.com/im-new>
16. Li-Fi – передача даних за допомогою світлодіодів. 5WATT. URL: <https://5watt.ua/uk/blog/statti/li-fi-peredacha-danikh-za-dopomogoyu-svitlodiodiv>
17. ECSTUFF4U for Electronics Engineer. *ECSTUFF4U for Electronics Engineer*. URL: <https://www.ecstuff4u.com/2020/01/lifi-advantage-disadvantage.html>
18. VsePlus.com. *Інтернет-магазин запчастин для мобільних телефонів, планшетів та аксесуарів України. Придбати все для ремонту мобільних телефонів у Києві | VsePlus 2023*. URL: <https://vseplus.com/ua/article/cto-takoe-arduino-783>
19. Що таке Arduino і що з ним можна зробити?. *Головна*. URL: <https://cutt.ly/MwrpoBgt>
20. Li-Fi based Text Communication between Two Arduino. *Circuit Digest - Electronics Engineering News, Latest Products, Articles and Projects*. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/li-fi-communication-between-two-arduino>

## ДОДАТОК А

### КОД ПЕРЕДАВЛЬНОЇ ЧАСТИНИ

```
1 //Transmitter Side:
2 #include <Keypad.h>
3 const byte ROW = 4;
4 const byte COL = 4;
5 char keyscodes[ROW][COL] = {
6   {'1', '2', '3', 'A'},
7   {'4', '5', '6', 'B'},
8   {'7', '8', '9', 'C'},
9   {'*', '0', '#', 'D'}
10 };
11 byte rowPin[ROW] = {A5, A4, A3, A2};
12 byte colPin[COL] = {A1, A0, 12, 11};
13 Keypad customKeypad = Keypad( makeKeymap(keyscodes), rowPin, colPin, ROW,
14 COL);
15 char keycount = 0;
16 char code[5];
17 void setup()
18 {
19   Serial.begin(9600);
20   pinMode(8,OUTPUT);
21   digitalWrite(8,LOW);
22 }
23 void loop()
24 {
25   char customKey = customKeypad.getKey();
26   if (customKey) {
27     Serial.println(customKey);
28     if (customKey == '1')
29     {
30       digitalWrite(8,HIGH);
31       delay(10);
32       digitalWrite(8,LOW);
33     }
34     else if (customKey == '2')
35     {
36       digitalWrite(8,HIGH);
37       delay(20);
38       digitalWrite(8,LOW);
39     }

```

```
40 else if (customKey == '3')
41 {
42     digitalWrite(8,HIGH);
43     delay(30);
44     digitalWrite(8,LOW);
45 }
46 else if (customKey == '4')
47 {
48     digitalWrite(8,HIGH);
49     delay(40);
50     digitalWrite(8,LOW);
51 }
52 else if (customKey == '5')
53 {
54     digitalWrite(8,HIGH);
55     delay(50);
56     digitalWrite(8,LOW);
57 }
58 else if (customKey == '6')
59 {
60     digitalWrite(8,HIGH);
61     delay(60);
62     digitalWrite(8,LOW);
63 }
64 else if (customKey == '7')
65 {
66     digitalWrite(8,HIGH);
67     delay(70);
68     digitalWrite(8,LOW);
69 }
70 else if (customKey == '8')
71 {
72     digitalWrite(8,HIGH);
73     delay(80);
74     digitalWrite(8,LOW);
75 }
76 else if (customKey == '9')
77 {
78     digitalWrite(8,HIGH);
79     delay(90);
80     digitalWrite(8,LOW);
81 }
82 else if (customKey == '*')
83 {
84     digitalWrite(8,HIGH);
```

```
85     delay(100);
86     digitalWrite(&LOW);
87 }
88 else if (customKey == '0')
89 {
90     digitalWrite(&HIGH);
91     delay(110);
92     digitalWrite(&LOW);
93 }
94 else if (customKey == '#')
95 {
96     digitalWrite(&HIGH);
97     delay(120);
98     digitalWrite(&LOW);
99 }
100 else if (customKey == 'A')
101 {
102     digitalWrite(&HIGH);
103     delay(130);
104     digitalWrite(&LOW);
105 }
106 else if (customKey == 'B')
107 {
108     digitalWrite(&HIGH);
109     delay(140);
110     digitalWrite(&LOW);
111 }
112 else if (customKey == 'C')
113 {
114     digitalWrite(&HIGH);
115     delay(150);
116     digitalWrite(&LOW);
117 }
118 else if (customKey == 'D')
119 {
120     digitalWrite(&HIGH);
121     delay(160);
122     digitalWrite(&LOW);
123 }
124 else:
125 }
}
```

## ДОДАТОК Б

### КОД ПРИЙМАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ

```
1 //Receiver Side:
2 #include <Wire.h>
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
5 #include <SoftwareSerial.h>
6 #include <Keypad.h>
7 void setup()
8 {
9   pinMode(8, INPUT);
10  Serial.begin(9600);
11  lcd.init();
12  lcd.backlight();
13  //lcd.backlight();
14  lcd.setCursor(0, 0);
15  lcd.print(" WELCOME TO ");
16  lcd.setCursor(0, 1);
17  lcd.print(" CIRCUIT DIGEST ");
18  delay(2000);
19  lcd.clear();
20 }
21 void loop()
22 {
23   unsigned long duration = pulseIn(8, HIGH);
24   Serial.println(duration);
25   if (duration >= 10000 && duration < 17000)
26   {
27     lcd.setCursor(0, 0);
28     lcd.print("Received: 1 ");
29   }
30   else if (duration >= 20000 && duration < 27000)
31   {
32     lcd.setCursor(0, 0);
33     lcd.print("Received: 2 ");
34   }
35   else if (duration >= 30000 && duration < 37000)
36   {
37     lcd.setCursor(0, 0);
38     lcd.print("Received: 3 ");
39   }
```



```

40 else if (duration ≥ 40000 && duration < 47000)
41 {
42   lcd.setCursor(0, 0);
43   lcd.print("Received: 4   ");
44 }
45 else if (duration ≥ 50000 && duration < 57000)
46 {
47   lcd.setCursor(0, 0);
48   lcd.print("Received: 5   ");
49 }
50 else if (duration ≥ 60000 && duration < 67000)
51 {
52   lcd.setCursor(0, 0);
53   lcd.print("Received: 6   ");
54 }
55 else if (duration ≥ 70000 && duration < 77000)
56 {
57   lcd.setCursor(0, 0);
58   lcd.print("Received: 7   ");
59 }
60 else if (duration ≥ 80000 && duration < 87000)
61 {
62   lcd.setCursor(0, 0);
63   lcd.print("Received: 8   ");
64 }
65 else if (duration ≥ 90000 && duration < 97000)
66 {
67   lcd.setCursor(0, 0);
68   lcd.print("Received: 9   ");
69 }
70 else if (duration ≥ 100000 && duration < 107000)
71 {
72   lcd.setCursor(0, 0);
73   lcd.print("Received: *   ");
74 }
75 else if (duration ≥ 110000 && duration < 117000)
76 {
77   lcd.setCursor(0, 0);
78   lcd.print("Received: 0   ");
79 }
80 else if (duration ≥ 120000 && duration < 127000)
81 {
82   lcd.setCursor(0, 0);
83   lcd.print("Received: #   ");
84 }

```

```
85 else if (duration >= 130000 && duration < 137000)
86 {
87     lcd.setCursor(0, 0);
88     lcd.print("Received: A    ");
89 }
90 else if (duration >= 140000 && duration < 147000)
91 {
92     lcd.setCursor(0, 0);
93     lcd.print("Received: B    ");
94 }
95 else if (duration >= 150000 && duration < 157000)
96 {
97     lcd.setCursor(0, 0);
98     lcd.print("Received: C    ");
99 }
100 else if (duration >= 160000 && duration < 167000)
101 {
102     lcd.setCursor(0, 0);
103     lcd.print("Received: D    ");
104 }
105 }
```