

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

Валерій ЯВІСЯ

_____ (підпис)

(Ім'я, прізвище)

“_04_” червня _____ 2020_р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”

(назва ОС)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,

(код і назва)

на тему: Принцип побудови і шляхи практичної реалізації мережі Li-Fi для управління автомобільним рухом

Виконала: студентка 4-го курсу, групи ТЗ-62

Піталова Марина Дмитрівна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: професор, доктор технічних наук, Романов О. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент: Доцент кафедри Телекомунікаційних систем Созонник Г. Д.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студентка _____

(підпис)

Київ – 2020_ рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Валерій ЯВІСЯ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

“ 22 ” січня 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Піталова Марина Дмитрівна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи __ Принцип побудови і шляхи практичної реалізації мережі Li-Fi для управління автомобільним рухом

керівник роботи: _ Романов О. І. Професор. Доктор технічних наук.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 30 березня 2020 р. № **924-с**

2. Термін подання студентом роботи __30.03.2020__

3. Вихідні дані до роботи __ Технологія LI-FI, LED лампы, Системи зв'язку V2X, Датчик зображення ОСІ

4.Зміст роботи __

1.Вступ – актуальність роботи.

2. Потенціал Li-Fi. Порівняльна характеристика Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу.

3. Аналіз стандарту для мереж Li-Fi.

4. Принцип побудови мереж Li-Fi. Перелік елементів, їх призначення та функції

5. Побудова мереж Li-Fi (VLC) для ITS (інтелектуальних транспортних систем).

6. Напрямки практичної реалізації ITS. Пропозиції для розробки аналога системи VLC на комерційно доступних світлодіодних задніх ліхтарів і програмно-визначених радіоприймачів (SDR)

7. Висновок

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Рис.1 Як працює Li-Fi

Рис. 2 Гаральд Хаас

Рис 3 мережеві топології, визначені в IEEE 802.15.7.

Рис.4 Архітектура стандартного пристрою стандарту VLC

Рис. 5 Архітектура системи VLC: приймально-передавальний ланцюг

Рис. 6 Можливі топології каналу VLC

Рис.7 Структурна схема програмованої системи мережі видимого світла

Рис.8 Архітектура програмного забезпечення вузла видимого світла.

Рис.9 Структура ITS та функціональна схема

Рис.10 Приклад автомобільного зв'язку, реалізованого за допомогою VLC та функціональна схема

Рис.11 Приклад використання VLC для світлофора

Рис. 12 Архітектура прототипу VLC, реалізованого на скутерах та функціональна схема

Рис.13 Ілюстрація оптичної системи зв'язку V2V.

Рис 14. Фотографія та структура ОСІ.

Рис.15 Як працює ОСІ

Рис.16 Функціональні схеми LED-передавача і приймача

Рис. 17 Структурна схема оптичної системи зв'язку V2V.

Рис 18. Метод вимірювання відстані між транспортними засобами.

Рис.19. Прототип оптичної системи зв'язку V2V.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 4.11.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз потенціалу Li-Fi. Порівняння з радіочастотним та інфрачервоним зв'язком.	13.04.20-19.04.20	
2	Аналіз стандартизації VLC. Мережеві топології	20.04.20-26.04.20	
3	Ознайомлення з архітектурою мережі VLC та її елементами.	27.04.20-03.05.20	
4	Вивчення взаємодії інтелектуальних транспортних систем.	4.05.20-10.05.20	
5	Вивчення напрямків практичної реалізації VLC в ITS.	11.05.20-17.05.20	

Студент

_____ (підпис)

Піталова М. Д.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Романов О. І.

_____ (прізвище та ініціали)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

Анотація

Обсяг роботи складає 52 сторінки, 19 рисунків, 1 таблицю і 10 джерел інформації.

Внутрішній зв'язок видимого світу (VLC) є багатообіцяючою технологією, щоб пом'якшити насуваючи кризу спектр традиційних смуг радіочастотного спектру. Ця робота вивчає, як забезпечити оптимальну за можливістю доступу Li-Fi-мережу для транспортних систем.

Метою даної роботи є розробка пропозицій щодо впровадження технології Li-Fi у транспортні системи (автомобілі, світлофори) для підвищення безпеки дорожнього руху. Комунаційна співпраця на дорозі включає в себе автомобіль-автомобіль, автомобіль-інфраструктура і навпаки. Ці дані можуть використовуватися для виявлення таких подій, як дорожні роботи, пробка, зближення з транспортним засобом швидкої допомоги і т.д.

Ключові слова: VLC, Li-Fi, ITS

За результатами даної роботи була опублікована стаття:

[1] Піталова М.Д., Мікляєв Г.О. “Багатовузлова мережа SDN з використанням технології Li-Fi”, Матеріали 14 МНТК «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2020 р.

Abstract

The volume of work is 52 pages, 19 figures, 1 table and 10 sources of information.

Indoor Visible Light Communications (VLC) are a promising technology to alleviate the looming spectrum crunch crisis in traditional RF spectrum bands.. This work examines how to provide the most accessible Li-Fi network for transport systems.

The purpose of this work is to develop proposals for the introduction of Li-Fi technology in transport systems (cars, traffic lights) to improve road safety. Communication cooperation on the road includes car-car, car-infrastructure and vice versa. This data can be used to detect events such as road works, traffic jams, approach to an ambulance, etc.

Keywords: VLC, Li-Fi, ITS

Based on the results of this work, an article was published:

[1] Піталова М.Д., Мікляєв Г.О. “ Багатовузлова мережа SDN з використанням технології Li-Fi ”, Матеріали 14 МНТК «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2020 р.

Зміст

Вступ

Розділ 1. Потенціал Li-Fi. Порівняльна характеристика Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу.

Розділ 2. Аналіз стандарту для мереж Li-Fi.

Розділ 3. Принцип побудови мереж Li-Fi. Перелік елементів, їх призначення та функції

Розділ 4. Побудова мереж Li-Fi (VLC) для ITS (інтелектуальних транспортних систем).

Розділ 5. Напрямки практичної реалізації ITS. Пропозиції для розробки аналога системи VLC на комерційно доступних світлодіодних задніх ліхтарів і програмно-визначених радіоприймачів (SDR)

Висновки

Вступ

WiFi керує нашим життям. Насправді, згідно з опитуванням, проведеним компанією Direct Line за допомогою Opinium Research, їх респонденти не могли б прожити довго без Wi-Fi. Але де б ви не знаходились у світі, ви, мабуть, відчули проблеми з підключенням до Інтернету в той чи інший момент.

LiFi - тип бездротового з'єднання, який може бути в 100 разів швидшим, ніж WiFi.

Уявіть собі світ, де ви можете підключитися до швидкісного Інтернету, просто натиснувши на свій вимикач світла. LiFi - це технологія бездротової оптичної мережі, яка використовує світлодіоди для передачі даних. Простіше кажучи, LiFi вважається WiFi на основі світла, який використовує світло замість радіохвиль для передачі інформації.

Використання світла для передачі даних дозволяє LiFi забезпечити кілька переваг, таких як робота в районах, сприйнятливих до електромагнітних перешкод, лікарні та кабіни літака, робота на більш високій пропускну здатності, при цьому пропонуючи більш високі швидкості передачі.

Наразі технологію LiFi розробляють численні організації у всьому світі.

Як працює LiFi?

LiFi - це система Visible Light Communications, що передає бездротовий Інтернет-зв'язок з дуже високою швидкістю. Ця технологія дозволяє світлодіодній лампочці випромінювати імпульси світла, які не можна виявити за допомогою людського ока, і всередині цих випромінюваних імпульсів дані можуть переходити до приймачів і від них. Потім приймачі збирають інформацію та інтерпретують передані дані. Це концептуально схоже на розшифровку коду Морзе, але значно швидше - мільйони разів

на секунду. Швидкість передачі LiFi може перевищувати 100 Гбіт / с, в 14 разів швидше, ніж WiGig, також відомий як найшвидший у світі WiFi.

У той час як технологія WiFi впливає на передачу даних на радіохвилях, LiFi робить наступний революційний крок у бездротовій еволюції та вбудовує та передає дані у промені видимого світла, тим самим дозволяючи LiFi в повній мірі скористатися значно більшою пропускнуою здатністю світлового спектру.

Як саме це працює

Дані фіксуються на модульованих частотах світла твердотілого світлодіодного джерела світла, а потім передаються та приймаються пристроями з підтримкою LiFi. Світлочутливий детектор демодулює світловий частотний сигнал і перетворює його назад в електронний потік даних і, роблячи це, - дозволяє швидше, ніж будь-коли, більш безпечно, двонаправлене бездротове спілкування.

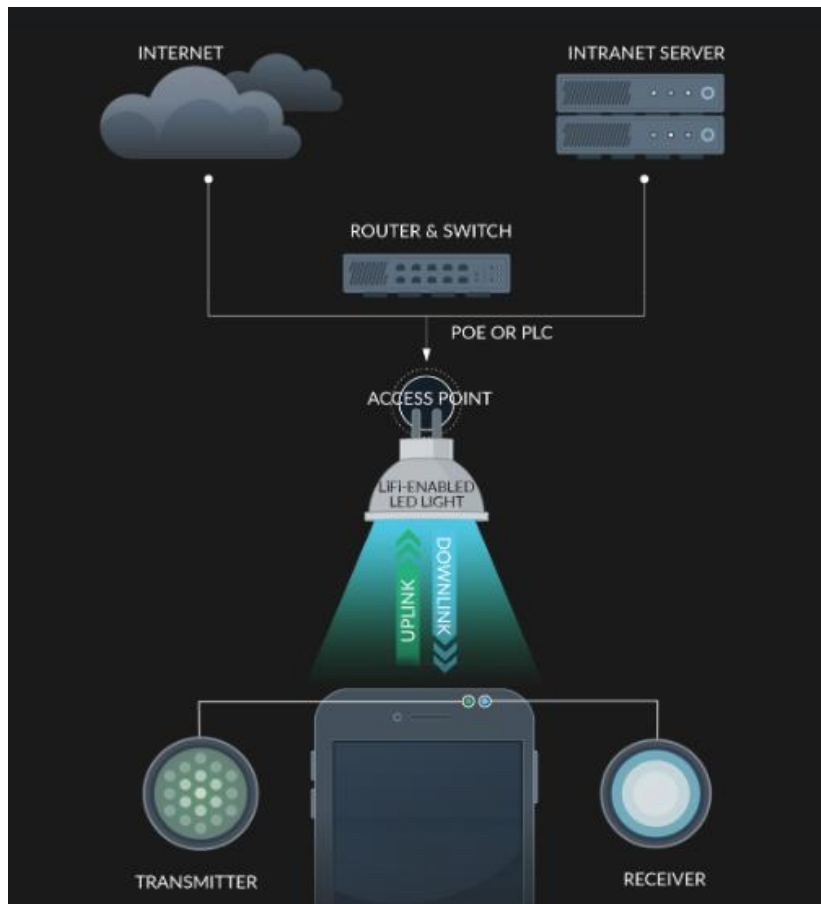


Рис.1 Як працює Li-Fi

Що означає LiFi для всіх?

Використання LiFi насправді не так відрізняється від використання WiFi; хіба що це було б дуже швидко.

У масштабах міста вуличні ліхтарі можуть надавати дані пішоходам, транспортним засобам та всіляким компонентам інфраструктури, які можуть потребувати даних. Незважаючи на те, що технологія використовується лише в промислових програмах, вона незабаром проникне в розумні будинки. Прогнозується, що майбутня автоматизація будинків буде залежати від LiFi через швидкість і безпеку.

Чому важливий LiFi?

Споживання бездротових даних щороку збільшується на 60%. Це означає, що радіочастотний простір повільно стає насиченим, що може призвести до явища, званого кризовим спектром. Кризовий спектр - це потенційна відсутність достатнього бездротового частотного спектру, необхідного для підтримки зростаючої кількості споживчих пристроїв, а також різних державних та приватних секторів використання радіочастот у широкому спектрі, виділених для різних типів бездротового зв'язку. Це викликає проблеми з бездротовими мережами, оскільки це негативно вплине на швидкість використання Інтернету.

Зрештою, WiFi не зможе йти в ногу з попитом на дані.

Коротка історія LiFi

Професор кафедри мобільного зв'язку в Единбургському університеті Харальд Хаас, вважається засновником технології LiFi. Він ввів термін LiFi, який означає точність світла, коли він просував цю технологію у своїх TED Global talk 2011 та допоміг запустити компанію з її продажу. Відповідно до цієї розмови про TED, LiFi може бути застосований у системах контролю руху, використовуючи фари автомобіля, або на хімічних заводах, де радіочастота занадто небезпечна і може спричинити іскри антени. LiFi надасть доступ до Інтернету в місцях, у яких Wi-Fi не може бути!



Рис. 2 Гаральд Хаас

Співзасновник компанії Haas називається pureLiFi, раніше pureVLC - фірма виробника обладнання, створена для комерціалізації продуктів LiFi для інтеграції з існуючими системами світлодіодного освітлення.

У вересні 2013 року компанія випустила першу у світі технологію LiFi у продаж. Li-1st ознаменував впровадження новаторської технології бездротового зв'язку та став першою у світі технологією LiFi, доступною на ринку. Li-Flame, який був випущений у лютому 2015 року, вважається першим продуктом LiFi, який дозволив мобільний бездротовий зв'язок. Через рік, pureLiFi та французька освітлювальна компанія Lucibel запустили перше у світі промислове рішення LiFi, розміщене в декількох місцях, включаючи паризьку штаб-квартиру Microsoft.

Головний директор з питань інновацій Lucibel Едуард Лебрун говорить про переваги цього партнерства.

«Це був серйозний прорив, досягнутий завдяки pureLiFi, що дозволило групі Lucibel стати зв'язком між світом світла та ІТ. Це промислове рішення було першим рішенням на ринку, яке було легко інтегруватись у будівлю, і склало частину промислової стратегії Lucibel, впровадженої протягом двох років, перемістивши виробничий завод у Францію».

У жовтні 2017 року була випущена система LiFi-XC. Цей пристрій є сертифікованою системою plug and play, яка працює з USB-пристроями і є достатньо малою, щоб бути інтегрованою у ваш ноутбук, планшет чи смарт-пристрій. У 2019 PureLiFi запропонував стартові набори LiFi академічним дослідникам.

Наскільки ми близькі до використання LiFi?

За прогнозами, LiFi буде випущений для широкої громадськості на початку 2022 року.

Зараз продуктовий магазин у Франції використовує LiFi для відстеження розташування своїх клієнтів у всьому магазині. Великі мобільні компанії, такі як Apple, також починають припускати, що їх майбутні пристрої будуть працювати з LiFi.

В даний час pureLiFi працює з партнерами в багатьох галузях, включаючи оборону, охорону здоров'я, освітлення, ІТ-інфраструктуру, телекомунікації.

Майбутнє LiFi

Зараз LiFi не може повністю замінити WiFi як джерело підключення, проте є кілька компаній LiFi (Signify, PureLiFi, Oledcomm і т.д.) , які наполегливо працюють над розробкою продуктів LiFi та маркетингом LiFi як основної бездротової технології. Попит на швидкий доступ до

Інтернету зростає з кожним днем, і LiFi може стати технологією задоволення цього попиту.

Розділ 1. Порівняльна характеристика Li-Fi з іншими технологіями бездротового доступу.

1.1 Загальне порівняння VLC, радіочастотного та інфрачервоного зв'язку.

Зв'язок VLC має деякі переваги в порівнянні з традиційним радіочастотним (РЧ) і інфрачервоним (ІЧ) зв'язком. Основною перевагою VLC є неліцензований і майже необмежений діапазон частот 400 ТГц для зв'язку. ІК має таку ж широку смугу частот, як і VLC, але вся смуга РЧ має ширину всього 300 ГГц, вона строго обмежена і регулюється. Використання більш високих радіочастот також має недолік, що полягає в зменшенні відстаней між лініями зв'язку, що впливає на придатність цих частот в певних програмах, таких як висока мобільність. Ще однією перевагою VLC є низьке енергоспоживання і низькі витрати на впровадження при використанні ламп освітлення для VLC. ІЧ і РЧ зв'язок вимагають власних базових станцій і споживання енергії в них. Найбільша різниця між радіочастотами в інфрачервоних і видимих променях - це поширення через перешкоди. РЧ може забезпечувати з'єднання через перешкоди, в той час як VLC і ІЧ можуть забезпечувати безпечні високошвидкісні з'єднання з користувачами в певній галузі. Це тому, що покриття і мобільність обмежені в VLC і ІК-зв'язку. РЧ зв'язок також страждає від електромагнітних завад (EMI), тоді як VLC і ІЧ можуть постраждати від навколишнього освітлення. При порівнянні ризиків для здоров'я технології РЧ можуть мати більше потенційних ризиків для здоров'я, ніж ІЧ і VLC.

Об'єднуючи декілька досліджень, Міжнародне агентство з дослідження раку (IARC) Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) класифікував радіочастотні електромагнітні поля як потенційно канцерогенні для людини. Тепловий вплив радіочастот на людину також добре відомий, але ризики і причини цього не були остаточно доведені. Технологія VLC має один відомий ризик для здоров'я, Небезпека синього світла (BLH), який може бути викликаний інтенсивним синім світлом, випромінюваних джерелами світла. Ризик не має значення при використанні нормальних рівнів освітленості і колірних температур. Ризики, пов'язані з інфрачервоним випромінюванням, є результатом ефекту нагрівання невидимого випромінювання, що поглинається шкірою і очима людини.

Радіочастотний і інфрачервоний зв'язок мають довшу історію стандартизації та досліджень, що призвело до кількох стандартів. Зокрема, радіочастотний зв'язок є найбільш стандартизованим середовищем бездротового зв'язку. ІЧ-зв'язок був частиною стандарту 802.11 WLAN, але його використання не стало популярним. В останні роки VLC був частиною стандартів. Узагальнене порівняння бездротових технологій показано в таблиці 1.

	VLC	РЧ	ИК
Пропускна здатність	Неліцензована , ~400 ТГц	Регульована, обмежена, <300 ГГц	~400 ТГц
Електромагнітні завади ЕМІ	Нема	Є	Нема
Споживана	Низька	Середня	Низька

потужність			
Мобільність	Обмежена	Необмежена	Обмежена
Стандарт	802.15.7	Декілька	802.11
Покриття	Вузьке	Широке	Вузьке
Вартість впровадження	Низька	Низько-середня	Середня

Таблиця 1. Порівняння бездротових технологій

1.2 Порівняння Li-Fi і Wi-Fi

Що таке WiFi?

WiFi, що означає Wireless Fidelity, - це назва технології бездротових мереж, яка використовує радіохвилі для створення бездротових мережевих з'єднань, надання доступу до Інтернету або передачі даних. Він дуже популярний, оскільки дозволяє користувачам отримувати доступ до мереж без необхідності фізичного проводу між пристроєм та передавачем. Коли на антену подається струм радіочастоти (РЧ), створюється електромагнітне поле, яке поширюється через будь-який простір. Це створює точку доступу, в якій користувачі можуть підключитися та отримати доступ. Ці точки доступу доступні на відстані від 20 до 50 метрів. Однак для підключення до точки доступу користувачеві потрібно буде встановити адаптер бездротової мережі на пристрій доступу.

Радіоспектр

WiFi працює в радіочастотному спектрі. Радіоспектр - частина електромагнітного спектра, що має частоти від 3 Гц до 3000 ГГц. Хвилі, що випромінюються в цьому діапазоні частот, що називаються радіохвилями, широко використовуються, особливо в телекомунікаціях,

завдяки чому вони схильні до перешкод, що виникають на різних частотах. Ось чому генерація та передача радіохвиль суворо регламентується національним законодавством у координації з Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ).

1.1.1 Переваги WiFi

Використання WiFi приносить багато переваг. Перш ніж створити WiFi, від користувачів вимагали фізичного підключення до модему через кабель Ethernet для того, щоб підключитися до Інтернету, що було громіздко і незручно. Доступ до Інтернету з відстані, наприклад, Далекий кінець офісу потребуватиме надзвичайно довгих кабелів, що може дорого коштувати. Для додаткових підключень також знадобляться додаткові кабелі, що однаково дорого. WiFi усунув необхідність фізичного підключення до серверів, щоб отримати доступ до локальних мереж та Інтернету. Оскільки з'єднання, встановлені через WiFi, є бездротовими, користувачам надається доступ практично з будь-якого місця в межах діапазону. А оскільки радіохвилі здатні проникати крізь стіни, користувачі можуть насолоджуватися WiFi-з'єднаннями в радіусі від 20 до 50 метрів від джерела.

Крім того, доступ до Інтернету через WiFi простий у здійсненні. Все, що вам потрібно, - це Інтернет-провайдер, який постачає підключення до Інтернету та маршрутизатор WiFi, який постачає точку доступу. Така простота в реалізації є основною причиною повсюдності доступу до Інтернету WiFi. Насправді сьогодні вам потрібно буде подорожувати далеко лише для того, щоб знайти місцевість, де немає точок доступу WiFi.

1.1.2 Недоліки WiFi

WiFi також має багато недоліків. Підключення до Wi-Fi, як правило, не є безпечним. Її недостатня безпека, як правило, пояснюється широким діапазоном сигналів, що дозволяє доступ до мережі в радіусі від 20 до 50 метрів. Це дозволяє іншим доступ до мережі, поки вони залишаються в межах досяжності. Навіть коли з'єднання захищено паролем, інші можуть спробувати взломати мережу, залишаючи вразливими всі приватні дані. Щоб протистояти цьому, більшість застосовують складні методи, що використовують високі технології для захисту своїх даних. Однак такі методи мають і свої слабкі сторони, які можна використовувати для отримання доступу. Вони також дуже дорогі в реалізації.

Ще одним недоліком WiFi-з'єднань є те, що сигнали, як правило, ненадійні. Це тому, що радіочастоти все ще піддаються різним зовнішнім перешкодам. Ці перешкоди можуть спричинити різні проблеми підключення, такі як забезпечення слабких сигналів, поганий прийом або навіть втрата зв'язку. Додайте до цього той факт, що WiFi-з'єднання за своєю суттю повільніше, ніж дротові. Зазвичай бездротові з'єднання мають швидкість від 1 до 54 Мбіт / с, тоді як дротові з'єднання мають швидкість 100 Мбіт / с і вище.

Що таке LiFi?

З іншого боку спектру лежить LiFi. LiFi, що означає Light Fidelity, є новою технологією, яка використовує технологію Visible Light Communication (VLC) замість радіохвиль для передачі даних. У LiFi твердотільне освітлення, таке як світлодіодні лампи, використовується для передачі даних і забезпечує доступ до Інтернету або бездротової мережі. Це відбувається шляхом модуляції світла, випромінюваного джерелом світла (передавачем), і приймається фотодіодом (приймачем). Сигнали, отримані від передавача, потім переводяться у корисні форми даних, які швидко

споживаються кінцевим користувачем. З'єднання, що надаються LiFi, зазвичай обмежені в просторі, де вони забезпечуються завдяки природі видимого світла.

Видимий світловий спектр

На відміну від радіохвиль, LiFi використовує видиме світло. Це дозволяє LiFi отримувати доступ до більшого діапазону доступних частот, оскільки спектр видимого світла в 10 000 разів більший, ніж весь радіочастотний спектр. Спектр видимого світла охоплює частоти від 430 000 до 770 000 ГГц, а кольори - від ультрафіолетового майже до інфрачервоного.

1.1.3 Переваги LiFi

За допомогою LiFi існує багато різних переваг. Однією з найбільших переваг є його ефективність. Оскільки LiFi використовує технологію VLC, яка, в свою чергу, використовує високоефективні світлодіодні лампи, користувачі можуть отримувати менші витрати з точки зору споживання енергії. Крім того, їм потрібні лише робочі світлодіодні світильники, які вже доступні в більшості домогосподарств та інших установ, що дозволяє додатково заощадити в плані витрат на установку.

Ще одна велика перевага LiFi полягає в тому, що використання світла дозволяє підключення LiFi майже миттєво, оскільки світло рухається з надзвичайно високою швидкістю. Це призводить до швидшої передачі даних та більш швидкого підключення до Інтернету - приблизно в 100 разів швидшого, ніж швидкості, досягнуті WiFi.

Оскільки в усьому світі вже є 14 мільярдів лампочок, його наявність ніколи не викликає сумнівів, оскільки може бути стільки мереж LiFi, скільки є лампочок.

Нарешті, природа видимого світла полягає в тому, що він не може проникати в непрозорі стіни. Це означає, що до тих пір, поки приміщення покриті непрозорими стінами, світло обмежується всередині простору, в якому воно світиться, тим самим обмежуючи зв'язок із простором, у якому воно світиться. Це запобігає несанкціонованому доступу до з'єднання LiFi, додавши ще один рівень безпеки до мережі.

1.1.4 Недоліки LiFi

Також у LiFi може бути багато недоліків. Найбільшим його недоліком є інфраструктура (або її відсутність). Оскільки технологія LiFi є відносно новою концепцією і наразі перебуває на стадії вступу, інфраструктура, необхідна для впровадження технології у досить великих масштабах, досі практично не існує. Це означає, що ще потрібно багато часу, перш ніж широка громадськість зможе користуватися технологією LiFi.

Ще один недолік полягає в тому, що джерело світла потрібно буде постійно включати, щоб забезпечити доступ до мережі. Цю проблему можна вирішити шляхом затемнення світла на рівні, які людське око може сприймати як вимкнене, але насправді все ще увімкнено.

Ще одним суттєвим недоліком з'єднань LiFi є те, що оскільки він покладається на світло для передачі даних, він стає дуже чутливим до зовнішніх перешкод. Фотодіоди здатні підбирати світло з конкуруючих джерел світла, таких як сонячне світло та інші форми освітлення. Це потенційно може створювати шум всередині приймача та спричиняти перебої в роботі мережі. У більшості систем LiFi оптичний фільтр встановлений на фотодіодних пристроях з метою фільтрації шуму, щоб приймач міг приймати лише сигнали, що надходять від передавача.

1.2 Потенціал LI-FI

Технологія VLC все ще перебуває на початковому етапі і необхідні значні зусилля, перш ніж їй можна буде використовувати весь потенціал для практичних застосувань. Проте, очікується, що ряд світлодіодних додатків буде готовий через кілька років у багатьох секторах: від внутрішнього супутника до військового призначення, від лікарень (де слід уникати електромагнітних завад) до літаків, від освітлення до автомобілів. Короткий список внизу.

Авіація. Пасажири в літаку не можуть використовувати радіохвилі. Світлодіодні ліхтарі вже використовуються в салонах літаків, і кожен з цих джерел може бути потенційними передавачами VLC для забезпечення як освітлення, так і медіа-послуг для пасажирів. Більш того, це дозволить знизити витрати на конструкцію літака і його ваги.

Розумне освітлення: розумні будівлі вимагають естетичного освітлення. Інтелектуальне освітлення з VLC забезпечує інфраструктуру як для освітлення, так і для зв'язку, а також скорочує схеми і споживання енергії в будівлі.

Небезпечні середовища: У таких середовищах, як нафтохімічні заводи, шахти і т. Д потенційно небезпечно, оскільки існує ризик вибуху, тому зв'язок стає важко запровадити. VLC може використовуватися в цій області, так як це безпечна технологія, що забезпечує освітлення та зв'язок одночасно.

Підключення пристрою: направляючи видиме світло на пристрій, можна отримати дуже високошвидкісний канал передачі даних і безпеку, тому що промінь світла висвітлюється контрольованим чином.

Захист і безпека: VLC може забезпечувати безпечний бездротовий зв'язок з високою швидкістю передачі даних у військових транспортних засобах і літаках.

Лікарні: У лікарнях деяке обладнання схильне до погіршення якості від радіохвиль, тому використання VLC має багато переваг в цій області.

Підводний зв'язок: VLC може підтримувати високі швидкості передачі даних під водою, де інші бездротові технології, такі як РЧ, не працюють. Таким чином, можливий зв'язок між дайверами або транспортними засобами з дистанційним управлінням

Транспортні засоби та транспорт. Світлофори і багато автомобілів використовують світлодіодні ліхтарі. Автомобілі можуть спілкуватися один з одним, щоб запобігти нещасним випадкам, а також світлофори можуть спілкуватися з автомобілем, щоб забезпечити безпеку на дорозі.

1.3 Висновок

Переглядаючи порівняння WiFi та LiFi, було б дуже важко вибрати один з них, оскільки обидва мають свої переваги - і свої недоліки.

Велике хибне уявлення про системи LiFi полягає в тому, що він був створений для заміни WiFi взагалі. Зважаючи на те, що більшість існуючої інфраструктури вже побудовані для розміщення радіочастотних технологій, було б дуже дорого і стомливо замінити всю цю інфраструктуру, щоб поступити місце новою технологією. З цієї причини LiFi потрібно розглядати як доповнюючу технологію, яка спрямована на підвищення продуктивності існуючої технології та надання полегшення вже перевантаженому радіочастотному спектру, який використовується для забезпечення WiFi-з'єднань.

Розділ 2. Аналіз стандарту для мереж Li-Fi

2.1 Історія стандартизації VLC

Успіх пристроїв VLC для додатків ITS (інтелектуальних транспортних систем) може бути прискорений завдяки ініціативам стандартизації. В даний час в стандартизації VLC беруть участь два об'єкти: Консорціум видимого світла (VLCC) в Японії і IEEE.

Цільова група 802.15 WPAN 7 запропонувала два стандарти на JEITA в 2007 році: один - Стандарт системи зв'язку видимого світла (JEITA CP-1221), в основному орієнтований на додатки для визначення місця розташування, а інший - Стандарт системи ідентифікації видимого світла (JEITA CP-1222), але вони не були комерційно використані.

Найбільш важливий внесок внесла 7-а робоча група IANE 802.15 WPAN, яка випустила перший офіційний стандарт VLC в другій половині 2011 року. Цей стандарт охоплює як радіоінтерфейс фізичного рівня (PHY), так і управління доступом до середовища (MAC). Стандарт IEEE 802.15.7 важливий для спільноти VLC, оскільки він являє собою основу для розробки продуктів з гарантованими функціональними можливостями. Це також забезпечує мінімальний орієнтир для майбутніх розробок. Стандарт призначений для підтримки різних очікуваних додатків, пов'язаних з персональними мережами VLC (VPAN).

2.2 Класи пристроїв для VLC

Для VLC розглядаються три класи пристроїв: інфраструктура, мобільні і транспортні засоби. Відповідно за їх фізичними властивостями і можливостями (такими як фізична мобільність, джерело живлення, додатки) визначаються їх специфікації, такі як діапазон і швидкості передачі даних. Наприклад, інфраструктура має «необмежене» енергопостачання, в той час як транспортні і мобільного засоби дуже обмежені. Грунтуючись на своїх додатках, автомобільні пристрої потребують низьких швидкостей передачі даних, великої відстані,

наприклад, для обміну інформацією про трафік, в той час як мобільні пристрої і пристрої інфраструктури можуть досягати набагато більш високих швидкостей на більш короткій відстані для обміну мультимедіа, такими як відео високої чіткості, онлайн-ігри і т. д.

2.3 Стандарт IEEE 802.15.7

Стандарт IEEE 802.15.7 визначає рівень РНУ і МАС для оптичної бездротового зв'язку ближньої дії з використанням видимого світла в оптично прозорих середовищах. Він здатний забезпечувати швидкість передачі даних, достатню для підтримки аудіо та відео мультимедійних послуг, а також враховує мобільність видимого каналу, сумісність з інфраструктурою видимого світла, погіршення через шум і перешкод від джерел, таких як навколишній світ і рівень МАС, який вміщує видимі посилення. Крім того, стандарт відповідає чинним нормам безпеки для очей.

Стандарт IEEE 802.15.7 підтримує три топології мережі: зірка, однорангова і ширококомвна передача. Ці топології показані на Рис, а їх основні характеристики узагальнені наступним чином:

- Зірка: зв'язок здійснюється між кількома пристроями і одним центральним контролером, званим координатором, який також використовується в якості інфраструктури освітлення. Решта пристрої, як правило, представляють собою мобільні термінали, що працюють від батарей.
- Однорангова: дозволяє двом пристроям обмінюватися даними, якщо вони знаходяться в межах досяжності один одного. Одне з пристроїв виступає в якості координатора зв'язку

- Широкомовна передача: один координатор відправляє дані на одне або кілька пристроїв односпрямованим способом.

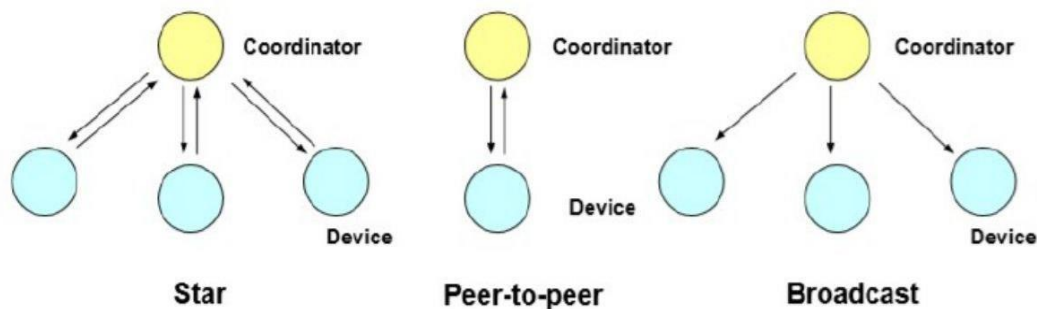


Рис 3 мережеві топології, визначені в IEEE 802.15.7.

Архітектура стандартного пристрою стандарту VLC, як показано на Рис4, крім стека OSI ISO, визначається з точки зору кількості рівнів і підрівнів; кожен рівень пропонує послуги для більш високих рівнів. Пристрій VPAN містить фізичний рівень (PHY), який містить випромінювач / приймач світла разом з його механізмом управління низького рівня, і підрівень управління доступом до середовища (MAC), який забезпечує доступ до фізичного каналу для всіх типів передач.

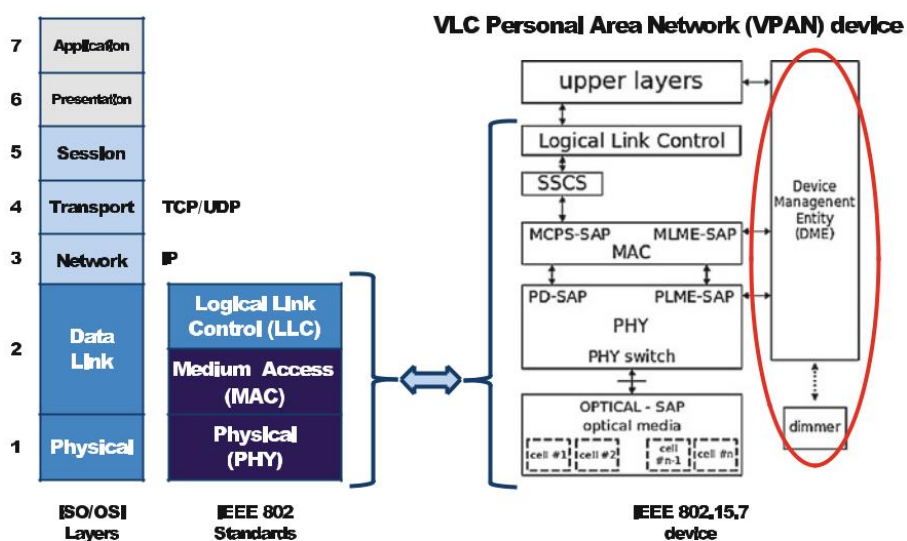


Рис.4 Архітектура стандартного пристрою стандарту VLC

Рівень управління логічним каналом (LLC) може здійснювати доступ до підрівню MAC через що залежить від послуги підрівень конвергенції (SSCS). Об'єкт управління пристроєм (DME) також підтримується в архітектурі. DME може взаємодіяти з PLME (об'єктом управління фізичним рівнем) і MLME (об'єктом управління каналом MAC) з метою поєднання MAC і PHY з диммером. DME може отримати доступ до певних атрибутів, пов'язаних з диммером, з MLME і PLME, щоб надати інформацію про диммірованіє MAC і PHY. DME також може управляти перемикачем PHY, використовуючи PLME для вибору оптичних джерел і фотоприймачів.

Рівень MAC обробляє проблеми управління фізичним рівнем, такі як адресація, запобігання конфліктів і протокол підтвердження даних. Багато функцій підрівня MAC спільно використовуються зі специфікаціями IEEE 802.15.4, такі як управління маяками, доступ до каналу, управління гарантованим часовим інтервалом (GTS), перевірка кадру, доставка підтвердженого кадру, асоціація і роз'єднання. Однак деякі функції властиві середовищі видимого світла, такий як видимість, захист від мерехтіння і затемнення.

Підтримка видимості надається у всіх топологіях для підтримки функції освітлення за відсутності зв'язку або в режимі очікування або в режимі прийому. Мета цієї функції - підтримувати освітлення і зменшувати мерехтіння.

Фізичний рівень ділиться на три типи; PHY I, II і III, і вони використовують комбінацію різних схем модуляції.

PHY I працює з 11,67 до 266,6 кбіт / с, PHY II працює з 1,25 до 96 Мбіт / с, а PHY III працює з 12 до 96 Мбіт / с. PHY I і PHY II визначені для одного

джерела світла, і вони підтримують включення-виключення (OOK) і змінну імпульсну модуляцію положення (VPPM). РНУ III використовує декілька оптичних джерел з різними частотами (квітами) і використовує певний формат модуляції, званий колірний маніпуляцією (CSK).

Кожен режим РНУ містить механізми для модуляції джерела світла, лінійного кодування з обмеженою довжиною прогону (RLL) і каналного кодування для прямого виправлення помилок (FEC).

Лінійні коди RLL використовуються для того, щоб уникнути тривалих запусків в 1 і 0 з, які потенційно можуть викликати проблеми з мерехтінням і виявленням синхронізації і відновлення даних (CDR). Коди рядків RLL приймають випадкові символи даних на вході і гарантують баланс постійного струму з рівними 1 і 0 з на виході для кожного символу. Різні коди ліній RLL, такі як Манчестер, 4B6B і 8B10B, визначені в стандарті і забезпечують компроміс між накладними витратами кодування і простотою реалізації.

Для застосування в ITS тип РНУ I є найбільш зручним, оскільки він розроблений спеціально для зовнішніх робіт. Хоча він забезпечує найнижчі швидкості передачі даних, надійні згорткові коди і коди Ріда-Саломона використовуються для прямого виправлення помилок для подолання додаткових втрат на трасі через більш довгої відстані і потенційних перешкод, створюваних джерелами оптичного шуму, такими як денне світло і флуоресцентне освітлення .

Режим модуляції РНУ I - два: маніпуляція з включенням-виключенням (OOK) і змінна імпульсна модуляція положення (VPPM). Кожен з них має відповідну оптичну тактову частоту, яка «ділиться» на різні схеми кодування для отримання остаточних результуючих швидкостей передачі даних.

Оптична тактова частота для РНУ I вибрана не вище 400 кГц, щоб врахувати той факт, що для світлодіодів, які використовуються в додатках, таких як світлофори, потрібні великі струми для управління світлодіодами і, отже, повільне перемикання.

При використанні ООК, як випливає з назви, дані передаються шляхом виключення і включення світлодіода. У найпростішому вигляді цифрова «1» представлена станом «світиться», а цифровий «0» представлено станом «не світиться». При самих повільних оптичних годиннику стандарт 802.15.7 використовує кодування Манчестера, щоб гарантувати, що період позитивних імпульсів такої ж, як і негативних, але це також подвоює смугу пропускання, необхідну для передачі ООК.

2.4 Висновок

У даному розділі розглянута історія стандартизації VLC. Особлива увага приділена стандарту IEEE 802.15.7. Цей стандарт спрямований на:

- 1.Забезпечення доступу до декількох сотень ТГц-діапазонів.
- 2.Забезпечення імунітету проти електромагнітних перешкод.
- 3.Зв'язок, щонадає додаткові послуги до існуючої інфраструктури видимого світла.
4. Визначення схем FEC (прямого виправлення помилок/ канального кодування), методів модуляції та швидкості передачі даних для зв'язку VLC.
- 5.Описання механізму доступу до каналу, таких як: період доступу до контенту (CAP), період без обмежень (CFP) та підтримка видимості.
6. Характеристики рівня РНУ та МАС.

Розділ 3. Принцип побудови мереж Li-Fi. Перелік елементів, їх призначення та функції

3.1 Типова архітектура VLC

Типова архітектура VLC, як показано на рис. 5, містить об'єкти передавача і об'єкти приймача, що обмінюються один з одним модульованим видимим світлом. Зв'язують об'єктами можуть бути кінцеві пристрої, такі як мобільні персональні пристрої, транспортні засоби та індикатори інфраструктури. Кожен об'єкт передає і приймає дані за допомогою випромінювача VLC і приймача VLC відповідно. Випромінювач VLC є оптоелектронний перетворювач, який передає інформацію з використанням видимого світла як фізичне середовище передачі; зазвичай використовуються світлодіоди високої яскравості. Світлодіоди модулюються на таких високих частотах, що людське око не може сприймати різницю в освітленні в порівнянні з тим, коли немає модуляції. В результаті передавачі VLC можуть використовуватися одночасно для освітлення і передачі даних. Приймач VLC є оптоелектронний перетворювач (фотодіод PIN, лавинний фотодіод або датчик CMOS), який приймає інформацію, попередньо модульовану в спектрі видимого світла, і перетворює її в електричні сигнали, які можуть оброблятися демодулятором / декодером.

Для каналу VLC можливі три типи топологій: спрямована лінія огляду (LOS), ненаправлена LOS, розсіяна NE-LOS. Як показано на рис. 6, спрямований LOS забезпечує найвищу інтенсивність для прийнятого сигналу і, таким чином, він має найвищу швидкість передачі бітів і найдовше відстань досягається за рахунок суворої необхідності точного вирівнювання; в ненаправленому LOS приймач має більш широке поле зору, вирівнювання простіше, але інтенсивність сигналу знаходиться на

середньому рівні, тому більш короткі відстані досяжні разом з високим / середнім бітрейтом; diffuse non-LOS - це проблеми з вільним вирівнюванням форми, але він підходить тільки в закритих середовищах і показує найнижчий бітрейт.

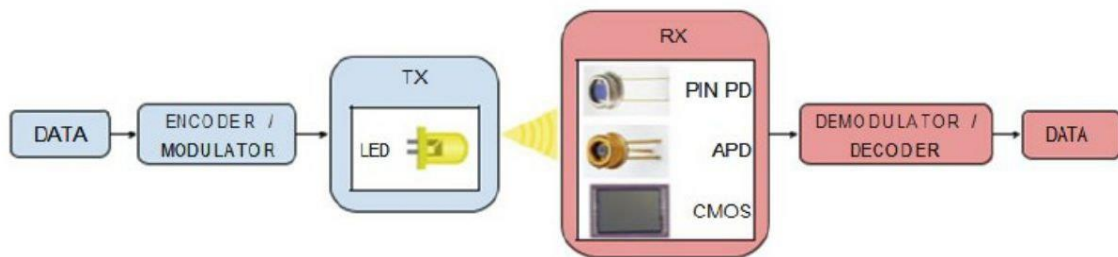


Рис. 5 Архітектура системи VLC: приймально-передавальний ланцюг

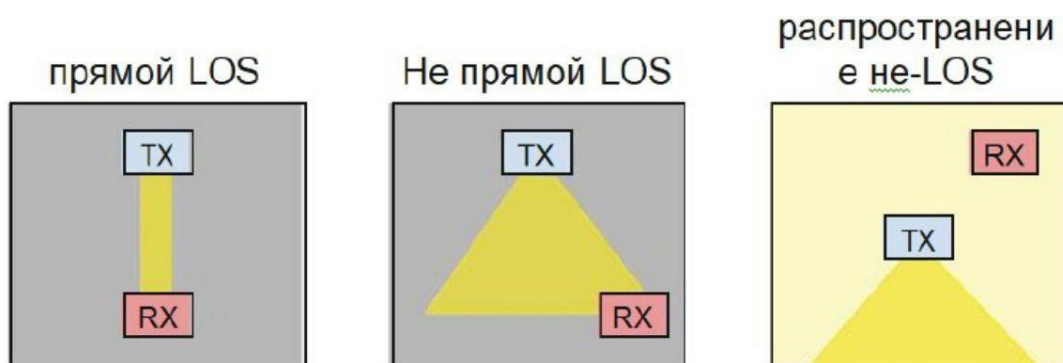


Рис. 6 Можливі топології каналу VLC

3.2 Багатовузлова мережа SDN

Більшість існуючих випробувальних лабораторій для видимого світла орієнтовані на реалізацію системи «точка-точка». Однак вже розроблені пропозиції до побудови систем видимого світла, які підтримують N вузлів.

На рис.7 представлено ієрархічна архітектура з трьома рівнями: хостом управління мережею, хостом управління SDR, апаратними засобами і інтерфейсами VLC. На верхньому (першому) рівні ієрархічної архітектури знаходиться вузол управління мережею. Вихід цього рівня являє собою набір оптимальних змінних, які потім будуть відправлені на кожен з керуючих хостів SDR. На другому рівні програмований стек протоколів (PPS) встановлюється на кожному з керуючих хостів SDR. З оптимальними змінними, отриманими від хоста управління мережею буде скомпільований стек протоколів PPS для генерації операційного коду для управління апаратними засобами VLC і зовнішніми інтерфейсами третього рівня. Нарешті, кожне апаратне і зовнішнє обладнання VLC (тобто USRP) отримує вибірки основної смуги частот від свого керуючого хоста через інтерфейс Gigabit Ethernet (GigE), а потім відправляє їх по радіоканалу з параметрами передачі, які зазначені в командах управління від SDR хостів.

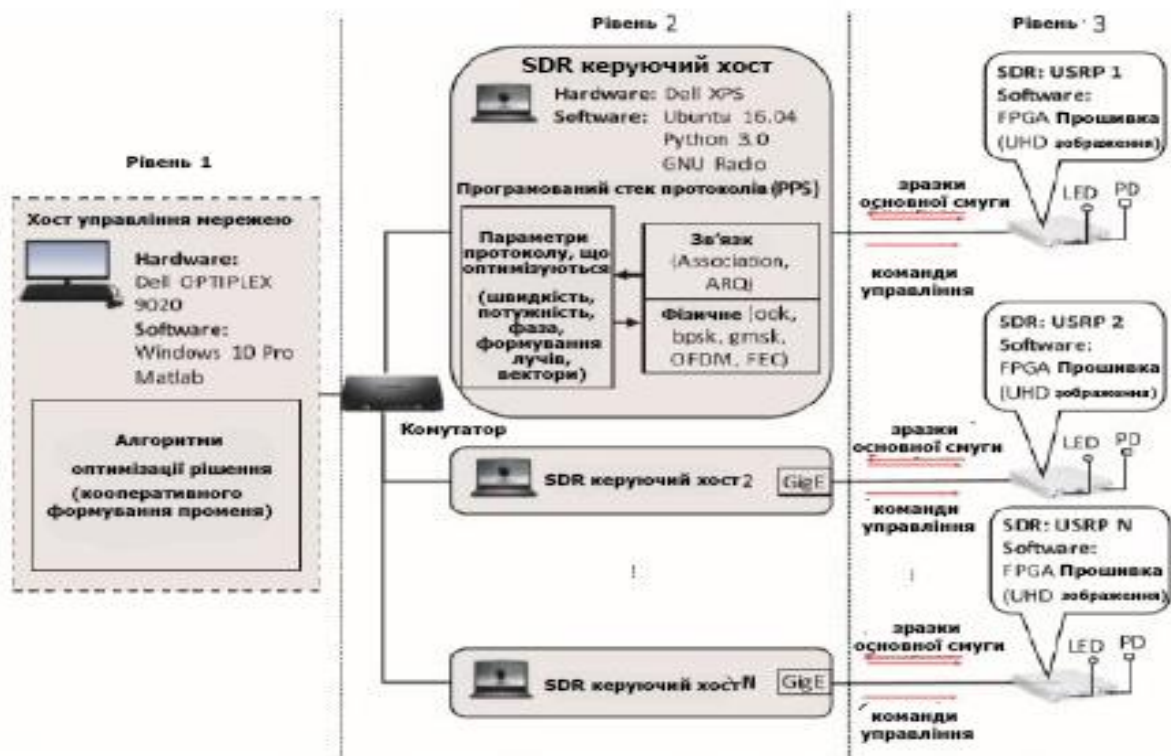


Рис.7 Структурна схема програмованої системи мережі видимого світла

Розглянемо призначення елементів системи:

1. Хост управління мережею - це настільний комп'ютер який має набір програм для вирішення завдань управління елементами мережі.

2. SDR керуючий хост - це програмований стек протоколів (PPS), який встановлюється на кожному з керівників хостів SDR. PPS може бути розробленим на програмному забезпеченні Python поверх GNU Radio. Це дозволяє забезпечити плавний контроль USRP. Наприклад, розроблений в роботі PPS охоплює РНУ і канальний рівні і дозволяє здійснити подальший розвиток у майбутньому. Як показано на рис.8, архітектура вузлів на основі PPS дозволяє здійснити перевірку ефективності мережі у видимому світлі. На фізичному рівні може підтримуватися широкий набір схем модуляції, включаючи, включення-виключення (OOK), гаусову маніпуляцію з мінімальним зрушенням (GMSK), двійкову фазову маніпуляцію (BPSK). Програмовані параметри на цьому рівні включають схеми модуляції і потужність передачі.

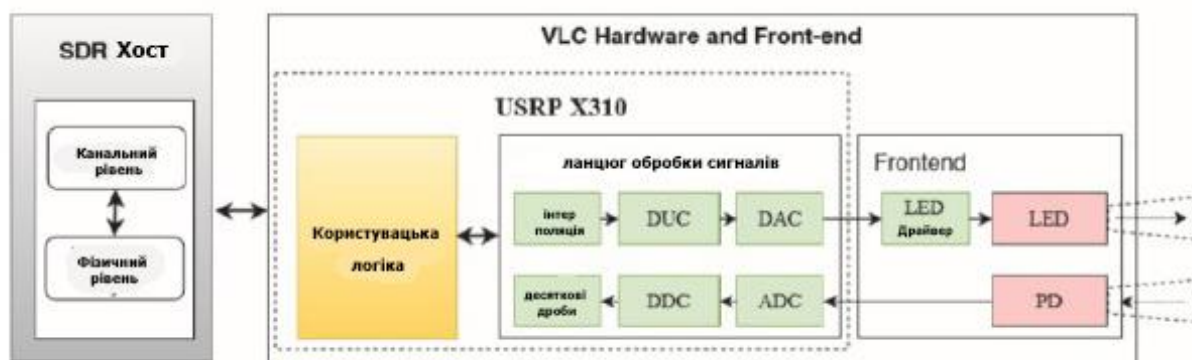


Рис.8 Архітектура програмного забезпечення вузла видимого світла.

3. VLC Hardware і Front-end може бути реалізованим на материнській платі USRP X310 і має чотири широкосмугових слота для дочірніх плат.

3.3 Висновок

У даному розділі розглянута система видимого світла, яка підтримує п вузлів, перелік її елементів, призначення та функції кожного елементу.

Розділ 4. Побудова мереж Li-Fi (VLC) для ITS (інтелектуальних транспортних систем).

4.1 Інтелектуальні транспортні системи

Найостаннішими досягненнями в області інтелектуальних транспортних систем (ITS), просуваються науковими колами, промисловими зацікавленими сторонами та організаціями по розробці стандартів (SDO), є так звані кооперативні ITS (C-ITS). Їх метою є використання і планування інфраструктури зв'язку та датчиків для підвищення безпеки дорожнього руху. Комунікаційна співпраця на дорозі включає в себе автомобіль-автомобіль, автомобіль-інфраструктура і навпаки. Дані, отримані від транспортних засобів та придорожніх пристроїв, можуть бути використані локально на кордоні геолокаційні мережі або передані на сервер для централізованого об'єднання і обробки. Ці дані можуть використовуватися для виявлення таких подій, як дорожні роботи, пробка, зближення з транспортним засобом швидкої допомоги і т.д. Такі дані обробляються з метою вироблення рекомендацій з водіння, призначених для однієї або конкретної групи водіїв, і передаються по бездротовій мережі на транспортні засоби.

Розробка C-ITS була обумовлена сценаріями використання, які в значній мірі бачать використання радіохвильової технології, як показано на рис. 9. У цій широкій і більш загальній структурі ми можемо визначити ряд випадків використання, в яких унікальні характеристики пристроїв VLC можуть використовуватися більш ефективним чином в порівнянні з традиційною радіохвильовою технологією. Однак варто підкреслити, що в порівнянні зі зрілою технологією, заснованої на радіочастотах, VLC все

ще перебуває на початковому етапі, і необхідні значні зусилля, перш ніж його можна буде широко розгорнути для додатків ITS малого радіусу дії.

4.2 Інфрачервоний зв'язок у інтелектуальних транспортних системах

Варто згадати, що до появи VLC на основі світлодіодів серія інфрачервоних (ІК) оптичних пристроїв успішно використовувалася в декількох проектах ITS в Кореї і Малайзії (електронна система стягування дорожніх зборів), Японія (система інформації і зв'язку транспортних засобів (VICS)).

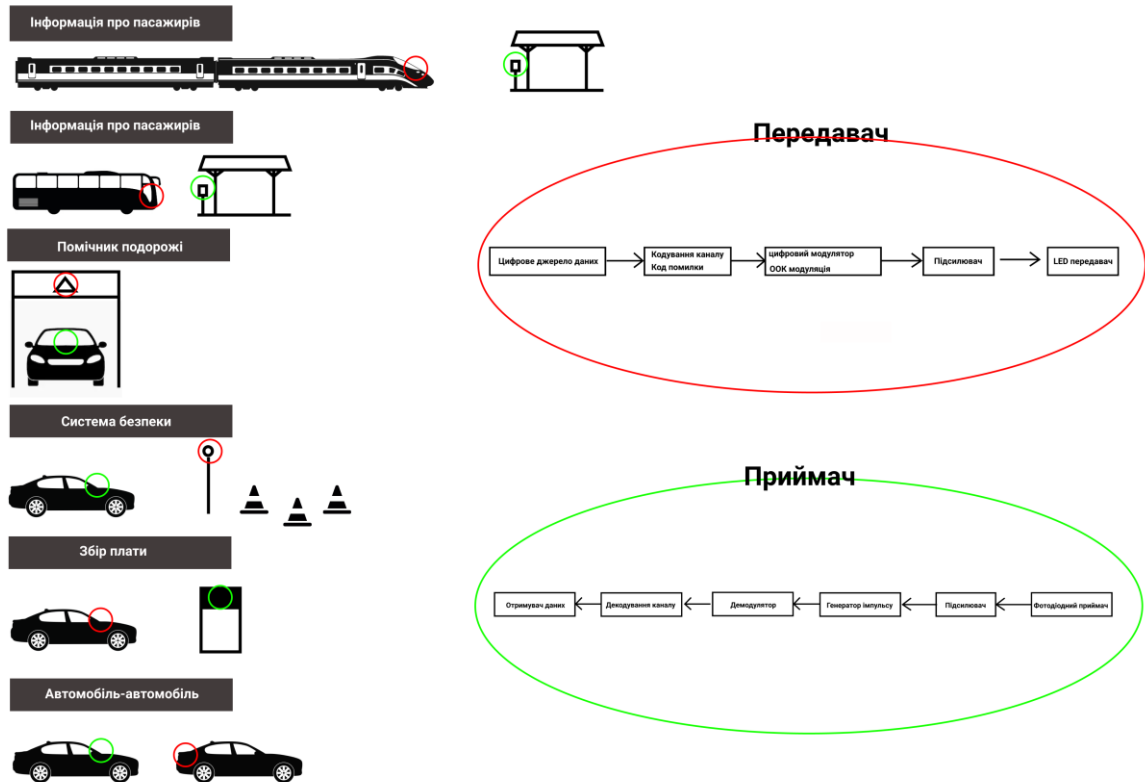
Урок, витягнутий з цих проектів, дозволив припустити, що ближній ІЧ-канал може використовуватися для передачі повідомлень в зоні прямої видимості від RSU до транспортних засобів і для прийому кадру маяка від транспортних засобів до RSU, а дальній інфрачервоний порт може використовуватися для відеоспостереження. Понад 50 тисяч приймачів ІЧ VICS вже встановлені на наземній дорозі в Японії, і більшість з них підключені до Центру управління рухом. Максимальна дальність дії інфрачервоних маяків VICS становить до 10 м при максимальній швидкості передачі даних 1 Мбіт / с і максимальному розмірі пакетних даних 59 байтів.

Як ІЧ, так і VLC використовуються для включення в так звані ITS інфраструктурні технології. Ця категорія містить технології, які не вимагають будь-якої традиційної телекомунікаційної інфраструктури для роботи. Дійсно, на відміну від стільникового зв'язку, яка спирається на базові станції і велика кількість антен, розгорнутих на всій території, безструктурні технології прості в установці, адаптуючи існуюче придорожнє поселення, і вони готові до використання протягом короткого часу. У зв'язку з цим VLC навіть дешевше, ніж РЧ, оскільки передавачами світлового сигналу є існуючі світлодіодні світлофори та світлодіодні

автомобільні фари, тому, якщо VLC використовується в додатках ITS замість РЧ, немає необхідності встановлювати спеціальні ПЧ-випромінювачі в навколишнє оточення.



Рис.9 Структура ITS



Функціональна схема до Рис. 9

4.3 Зв'язок V2X

Дорожні світлофори і транспортні засоби поступово переходять від електричних лампочок на світлодіодні через переваги енергозбереження, тривалого терміну служби, низьких витрат на технічне обслуговування, кращої видимості і низької температури. Ці нові лампи можуть бути використані в якості передавачів інформації, сигнали яких передаються інфраструктурними вогнями і виявляються приймачами, встановленими на транспортних засобах (зв'язок I2V). RSU, такі як світлодіодні світлофори, добре підходять для передачі інформації в автомобільних системах зв'язку в режимі I2V. Інформація, що відноситься до безпеки дорожнього руху, може передаватися безперервно без додаткового енергоспоживання, покращуючи безперебійний рух транспорту, а також зменшуючи кількість аварій і нещасних випадків. Оскільки світло йде прямо, можливий висконапрявлений зв'язок, наприклад, різна інформація може бути передана для кожної смуги дороги.

Автомобілі також можуть обмінюватися даними з сусідніми транспортними засобами (зв'язок V2V), використовуючи головні, задні і стоп-сигнали; в прикладі сценарію V2V транспортний засіб перед світлофором приймає інформацію і передає її за допомогою стоп-сигналів на транспортний засіб, що йде позаду. З точки зору транспортної спеціалізованої мережі VLC можна розглядати як новий канал доступу поруч з існуючими радіочастотами. Як показано на рис.10, потенційні додатки систем V2X такі ж, як і для радіочастотних каналів, включаючи активну безпеку дорожнього руху, ефективність руху, місцеві послуги та послуги на основі Інтернету. Очевидно, що затримки і обмеження досяжності для обміну даними більш жорсткі для додатків, критичних для безпеки, в порівнянні з іншими типами, але недавні дослідження показали, що вони можуть бути оснащені VLC і готовими компонентами.

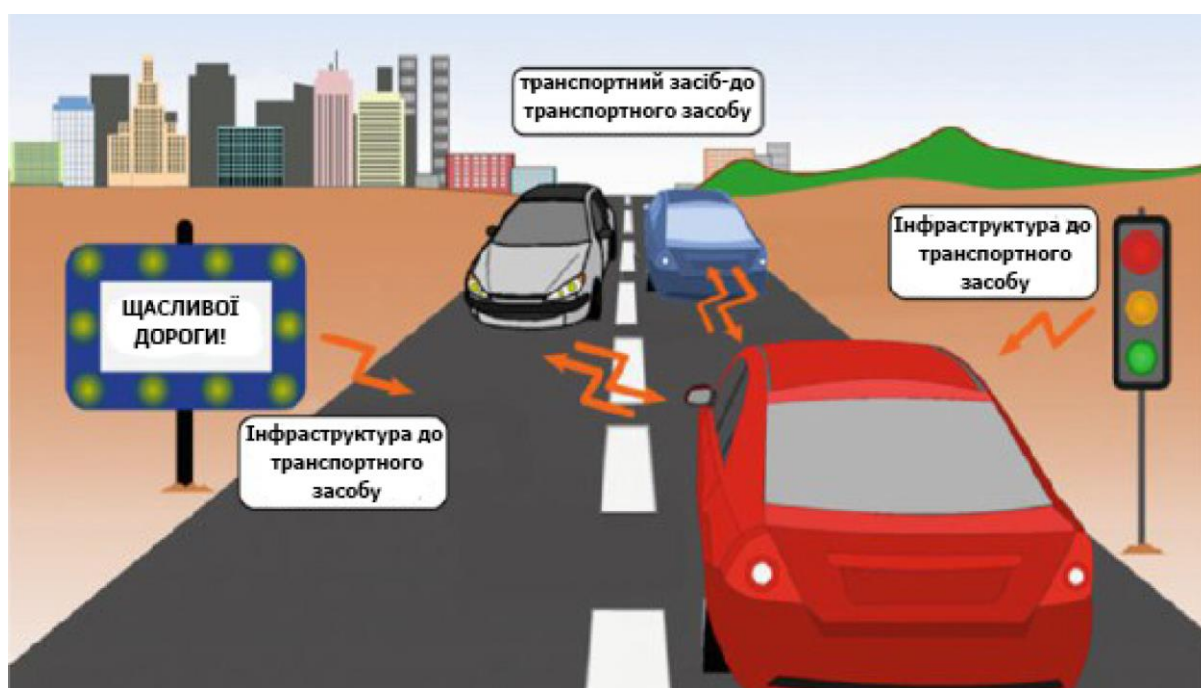


Рис.10 Приклад автомобільного зв'язку, реалізованого за допомогою VLC



Функціональна схема до Рис.10

Зовнішні канали VLC залежать від наявності безперервної лінії прямої видимості (LOS), тому в сценаріях автомобілів з високою щільністю буде спостерігатися збільшення кількості з'єднань між транспортними засобами, що могло б поліпшити доставку даних, так як стає доступним кілька шляхів, оскільки все більше транспортних засобів з'єднуються разом з оптичними зв'язками. І навпаки, в такий ситуації зв'язок R / F може привести до проблем з продуктивністю через широкомовні шторми, порушення роботи додатків, критичних для безпеки, в реальному часі і поширення інформації.

Звичайно, зовнішні мобільні оптичні мережі створюють деякі технічні проблеми і проблеми щодо VLC всередині приміщень: (i) відносна мобільність між транспортними засобами або між інфраструктурою і транспортними засобами, ймовірно, порушить зв'язок LOS; (ii) VLC поза приміщенням в значній мірі залежить від природного і штучного освітлення, в основному сонячного світла, що додає шум і перешкоди приймається сигналу. Перша проблема може бути вирішена шляхом оптимізації фіксованого та мобільного (на транспортному засобі) позиціонування освітлення, в той час як перешкоди можуть бути

мінімізовані за допомогою оптичних фільтрів і оптимізованої електроніки. У всякому разі, ці проблеми накладають певну межу на можливу дальність зв'язку. Ряд експериментальних результатів і моделювання показав, що надійний VLC зв'язок можливий, коли VLC-передавач і VLC-приймач знаходяться на відстані не більше 40-50 м.

Було виконано велику кількість аналітичних досліджень, заснованих на чисельному моделюванні, для вивчення переваг використання VLC-доповнюють повідомлень RF DSCR для реалізації технологій, пов'язаних з ITS, таких як кооперативний адаптивний круїз-контроль (CACC). і вдосконалена система допомоги водієві (ADAS), серед інших.

4.4 Висновок

У даному розділі було розглянуто поняття інтелектуальної транспортної системи та які зв'язки об'єднують транспортні засоби та інфраструктуру. Розглянута можливість впровадження VLC. Проблеми, які можуть виникнути та їх рішення.

Розділ 5. Напрямки практичної реалізації ITS. Пропозиції для розробки аналога системи VLC на комерційно доступних світлодіодних задніх ліхтарів і програмно-визначених радіоприймачів (SDR)

5.1 Практична реалізація VLC у ITS

Як тільки технологія світлодіодів високої потужності почала з'являтися, одне з перших запатентованих додатків VLC було в області застосування ITS. Дійсно, використання світлодіодних світлофорів для передачі

інформації було запатентовано в США ще раніше, ще до того, як були проведені дослідження в цій області. Згодом, на початку 2000-х років, багато дослідницькі групи почали досліджувати цю нову технологію, і був розроблений ряд прототипів, які розширюють сферу застосування від I2V до V2V. У той же час, інтерес до VLC виріс і інші області застосування починали вивчати для застосування на практиці. Це послужило підставою для створення спеціальної робочої групи IEEE по стандартизації VLC для персональних мереж, яка в кінці 2011 року випустила першу офіційну версію стандарту IEEE 802.15.7.

Хоча до цих пір жодна комерційна технологія VLC не потрапила в область ITS, існує серія прототипів, які можна умовно розділити на два класи: ті, які були отримані в результаті досліджень, розпочатих до публікації стандарту IEEE 802.15.7, і ті, які були створені після IEEE 802.15.7 стандарт, намагаючись продемонструвати, як його можна використовувати для додатків ITS. Цей розділ містить найбільш значущі результати, досягнуті дослідниками до появи стандарту, в той час як в наступних розділах будуть представлені стандарт і його останні спроби застосування в ITS.

Починаючи з I2V-зв'язку, базові характеристики світлофора на основі світлодіодів з точки зору відповідної модуляції, необхідного SNR і обсягу одержуваної інформації були спочатку проаналізовані Akanegawa et al.

5.2 Прототип світлодіодних світлофорів

Зовсім недавно був розроблений прототип світлодіодних світлофорів з використанням дискретних компонентів для оптоелектронних компонентів і цифрових схем FPGA для частин обробки сигналів як для передавача, так і для приймача. Схема модуляції, що використовується для цієї системи, була заснована на методах розширення спектра прямий

послідовності. Тестові випробування прототипу показали, що вузьким місцем для швидкості передачі даних був передавач, де була досягнута швидкість передачі даних 200 кбіт / с. З іншого боку, приймач був здатний семплірувати сигнал в 5 разів з максимальною швидкістю 1 Мбіт / с. Обмеження швидкості передачі даних відбувається на стороні передавача, тому що світлофору потрібна велика сила струму, але включення і виключення такого струму на високій частоті як і раніше важко.

Система передачі повідомлень зі світлофора на автомобілі була також створена досвідченими дослідниками з Університету Версаля. Основне застосування для системи, яку вони запатентували, - це зв'язок між світлофорами і автомобілем для передачі, наприклад, зворотного відліку до наступного зміни сигналу світлофора, як показано на Рис. 11. Інтерес також полягає в тому, щоб попередити транспортні засоби та керувати двигуном для швидкого перезапуску або для запуску зеленої хвилі.

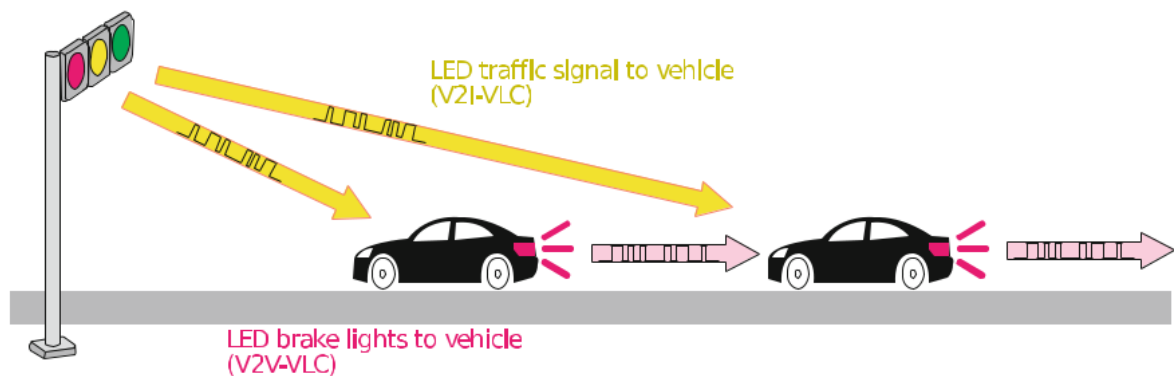
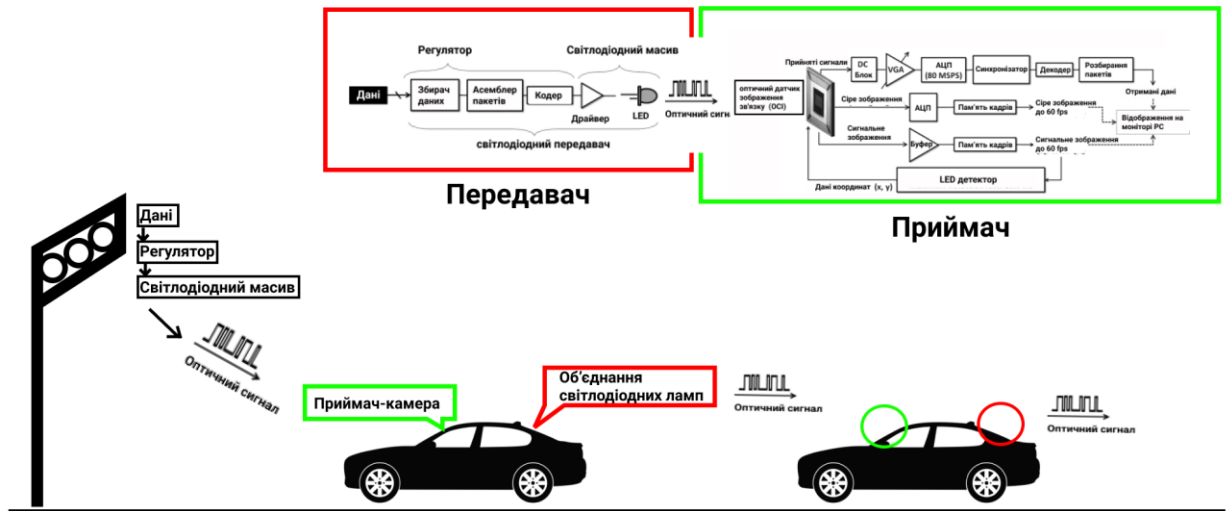


Рис.11 Приклад використання VLC для світлофора



Функціональна схема до Рис11

Система складається з блоку радіомовної станції, представленого світлодіодним світлофором і приймачем на основі фотодіодів. І випромінювач, і приймач пов'язані з ПК. Модуль випромінювача був розроблений на основі комерційного світлофора на основі світлодіодів, щоб з'ясувати, до якого моменту будь-світлофор може стати пристроєм мовлення даних з невеликими змінами і з меншими витратами. Ті ж самі обмеження по вартості були використані також для проектування схем і вибору електронних компонентів як для сторони випромінювача, так і для сторони приймача. Більш детально, логіка реалізована за допомогою 8-бітних мікроконтролерів на стороні передавача і приймача. Приймач використовує фотодіод з PIN-кодом, сигнал якого посилюється за допомогою автоматичного управління посиленням (AGC), щоб отримувати дані як на короткі, так і на великі відстані. AGC особливо корисний на короткій відстані, тому що він запобігає насиченню модуля фотодетектора. Оптична складова перед фотодіодом зменшує кут огляду

приймача до $\pm 10^\circ$. Система надійна, але не підходить для реалізації складного мережевого стека. Дійсно, використовуються базові схеми кодування модуляції, такі як код Манчестера і код Міллера. Обидва коду використовують амплітудну модуляцію ООК (On-Off Key-ing), яка проста і добре підходить для передачі даних на частотах в десятки кілогерц.

Експериментальні випробування проводилися на світлофорі (червоне і зелене світло), встановленому в коридорі лабораторії або на вулиці. В основному, повідомлення, передане під час експериментів, відправляється емітера, і кадр вказує, чи вибраний код Міллера або Манчестера. Приймач декодує дані в режимі реального часу, а алгоритм допускає постобработку або розрахунок помилок. Для перших експериментів конкретне повідомлення, складене 7 символами ASCII, відправляється безперервно з використанням частоти модуляції 15 кГц. Виявлена безпомилкова передача (BER 10⁻⁷) на відстані до 50 м на вулиці при денному освітленні і до 20 м в приміщенні з штучним освітленням.

Використання VLC для зв'язку V2V було досліджено багатьма дослідницькими групами: вважається, що VLC може забезпечити як точне позиціонування, так і забезпечити безпеку транспортного засобу.

Архітектура таких пристроїв була зображена з різним ступенем деталізації в багатьох дослідженнях. Крім того, було проведено багато чисельного моделювання для оцінки продуктивності цих систем в порівнянні з RF DSCR. Однак набагато менше прототипів було реалізовано і протестовано, демонструючи багатообіцяючі особливості цієї технології. Деякі з них використовують недорогі компоненти, в той час як інші використовують більш витончені пристрої, такі як високошвидкісні камери і спеціальні датчики зображення CMOS.

5.3 Прототип для реалізації системи VLC на скутерах

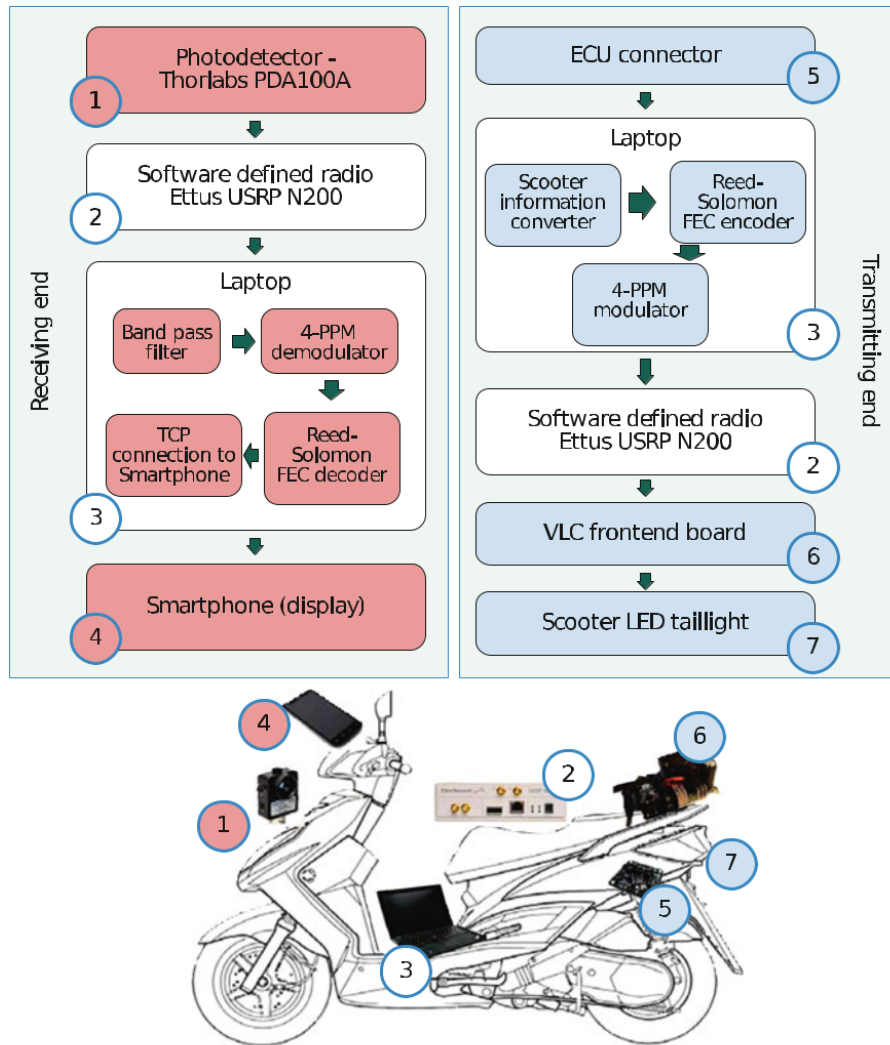
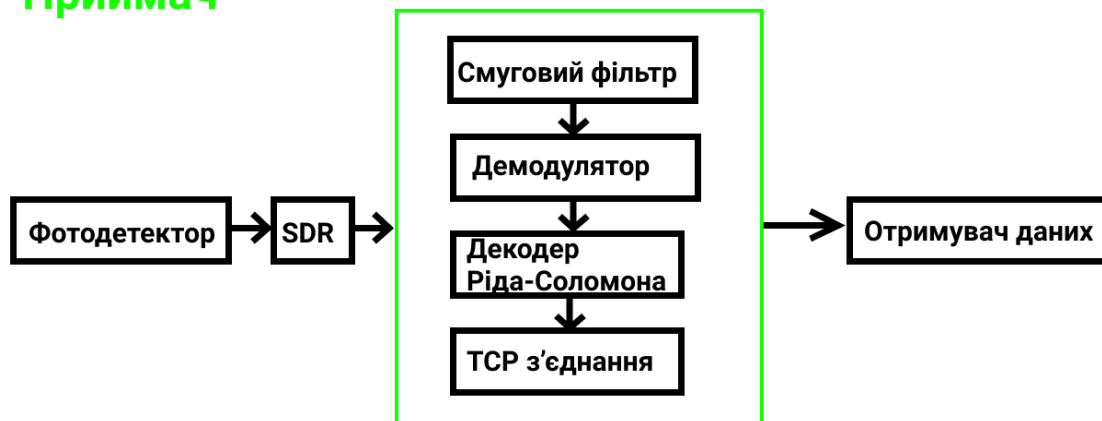
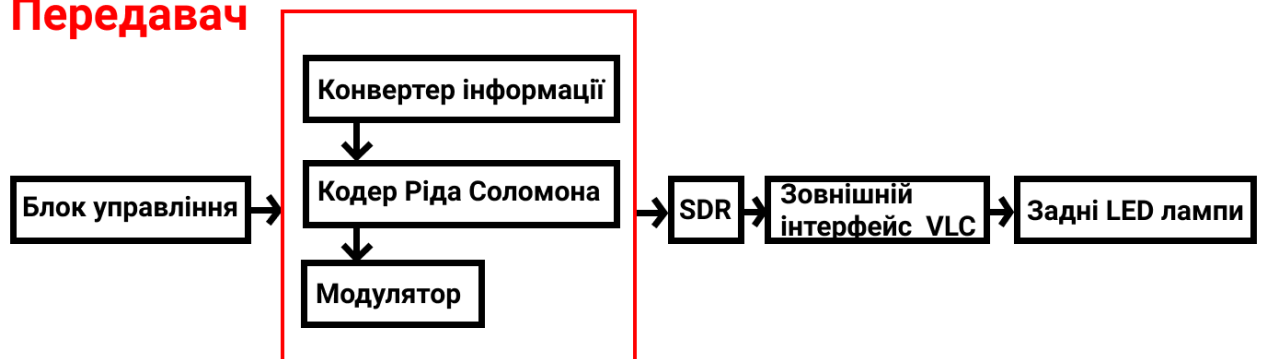


Рис. 12 Архітектура прототипу VLC, реалізованого на скутерах

Приймач



Передавач



Функціональна схема до Рис.12

Цікавим прикладом недорогих пристроїв є створення прототипу для реалізації системи VLC на скутерах з використанням комерційно доступних світлодіодних задніх ліхтарів і програмно-визначених радіоприймачів (SDR). На малюнку 12 показана системна блок-схема прототипу. На передавальному кінці роз'єм електронного блоку управління (ECU) періодично збирає зі скутера таку інформацію, як поточна швидкість, обороти двигуна, стан гальма і стан сигналу повороту, і відправляє її на ноутбук. У ноутбучі створюються цифрові пакети з інформацією в якості корисного навантаження і нижнього колонтитула з кодом прямого виправлення помилок (FEC), а потім модулюються за допомогою 4-імпульсної модуляції положення (4-PPM). Пакет проходить

цифро-аналогове перетворення в SDR і передається на зовнішній інтерфейс VLC, який змінює інтенсивність світла задньої світлодіодної лампи відповідно до вхідним аналоговим сигналом. На приймальному кінці фотоприймач перетворює прийнятий оптичний сигнал в електричний сигнал, який проходить аналого-цифрове перетворення в SDR. Потім ноутбук виконує процеси демодуляції і декодування, щоб отримати інформацію про скутері в вихідному пакеті. Нарешті, інформація відправляється на смартфон, встановлений на кермі скутера. Смартфон видає попередження, а також інформацію про попередньому скутері водієві, коли можливо зіткнення з цим скутером.

Вибір використання SDR мотивований, тому що він дозволяє гнучко змінювати різні конструкції фізичного рівня і мережеві протоколи під час прототипування. Згодом, коли дизайн пристроїв буде орієнтований на комерційний продукт, ці проекти можуть бути перенесені в польову програмовану матрицю затворів (FPGA) або спеціалізовану інтегральну схему (ASIC) для зниження витрат.

Дорожні випробування проводилися з одностороннім зв'язком, реалізованої між двома скутерами таким чином, що задній ліхтар самоката попереду передавав дані на фотоприймач, розташований на передній частині гоночного скутера. Жодна лінзу не обов'язково використовувалася перед фотоприймачем, що призводило до широкому куту поля зору в 90° (FOV), в той час як на стороні передавача кут променя був більш вузьким (близько 20°).

Експерименти проводилися в сонячний день без дощу і туману. Обидва скутера працювали на реальній дорозі зі швидкістю від 10 до 40 км / ч. 20-байтові пакети, які містять інформацію про поточну швидкість, стан

гальмування і т. Д., Безперервно транслювалися з заднього ліхтаря зі швидкістю передачі даних 10 кбіт / с. Виміряна втрата пакетів на приймальній стороні показала прийнятний рівень, коли відстань між скутерами знаходилося в діапазоні близько 4-14 м.

5.4 Система зв'язку V2V з використанням камери-приймача та LED- передавача

Переходячи від дешевих систем до більш складних систем, розробка VLC на основі датчиків зображення для автомобільних додатків показує унікальні характеристики, які заслуговують на те, щоб їх описати. Це альтернативний підхід, який намагається інтегрувати спеціальну функцію приймача в звичайний датчик зображення. Ця система зв'язку V2V, досліджена в центральних науково-дослідних лабораторіях Toyota, використовує світлодіодний передавач, здатний відправляти різні дані за допомогою оптичних сигналів зі швидкістю 10 Мбіт / с, і приймач камери, в якому використовується спеціальний датчик зображення CMOS, тобто датчик зображення оптичного зв'язку (OCI).

Рис 13. ілюструє оптичну систему зв'язку V2V. На цьому малюнку передній автомобіль (ПА) має світлодіодні передавачі, які використовують світлодіодні джерела світла автомобіля, такі як задні ліхтарі, гальмівні та головні фари. Задній автомобіль (ЗА) має камеру-приймач. ПА збирає власні різні внутрішні дані (наприклад, швидкість) та передає ці дані до ЗА оптичними сигналами. У той же час приймач камери на ЗА фіксує зображення та шукає світлодіодні ділянки у захоплених зображеннях за допомогою різних технік обробки зображень. На Рис.13, світлодіодні області позначені зеленими прямокутниками. Згодом система приймача відстежує зміни інтенсивності світла у виявлених світлодіодних областях та приймає оптичні сигнали.

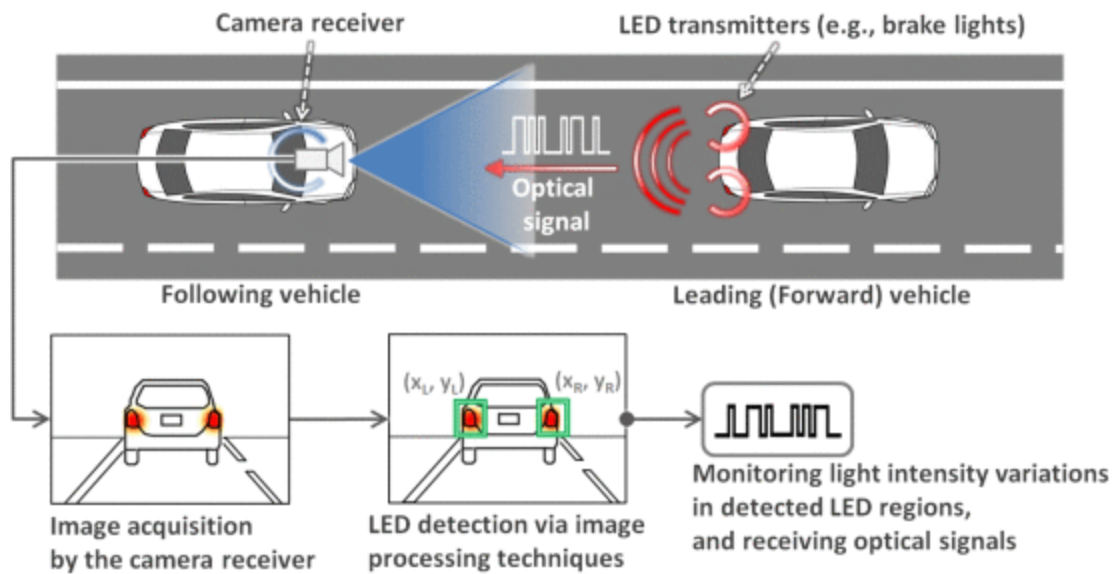


Рис.13 Ілюстрація оптичної системи зв'язку V2V.

Надалі зображення, зняті приймачем камери, будуть використовуватися не лише для детектування світлодіодів, але і для програм безпеки та комфорту, таких як виявлення смуги руху та виявлення пішоходів. Іншими словами, камера для системи OWC та камера для системи обробки зображень будуть поєднані, а для обох функцій буде використана одна камера. Отже, збільшення витрат буде невеликим, оскільки більшість компонентів камери можуть бути спільними, і додаткового місця для приймача камери не потрібно. Більше того, оскільки ця система може згрупувати два результати (результати передачі даних та результати обробки зображень) то можуть з'явитися нові програми.

Як відомо, OWC - це лінія прямого огляду (LOS). Оскільки оптичні сигнали поширюються за прямою лінією, зв'язки OWC легко блокуються об'єктами, через які світло не може проникати, наприклад, будівлями, стінами, густим газом та густим туманом. Крім того, діапазон зв'язку обмежений у областях, що перекриваються кутом випромінювання світла світлодіодного передавача та кутом огляду (кут зору, AOV) приймача камери.

5.5 Датчик зображення ОСІ

У цьому дослідженні в приймачі камери використовується спеціальний датчик зображення CMOS - ОСІ. На Рис. 14 зображено фотографію та структуру ОСІ. ОСІ виготовлений за технологією CMOS-датчика. Для досягнення прийомів швидкісних оптичних сигналів винайдено CPx. CPx, забезпечує вдосконалення швидкості реакції на зміни інтенсивності світла, і він вже продемонстрував прийом оптичного сигналу 20 Мбіт / с на піксель. Як показано на цьому малюнку, масив пікселів ОСІ складається з масивів (CPx) та пікселів зображення (IPx). Масив IPx фіксує зображення для виявлення світлодіодних передавачів, а масив CPx приймає оптичні сигнали. Цей гібридний піксельний масив інтегрований в ОСІ з периферійними схемами, які керують обома піксельними масивами і обробляють захоплені сигнали зображення та отримують оптичні сигнали.

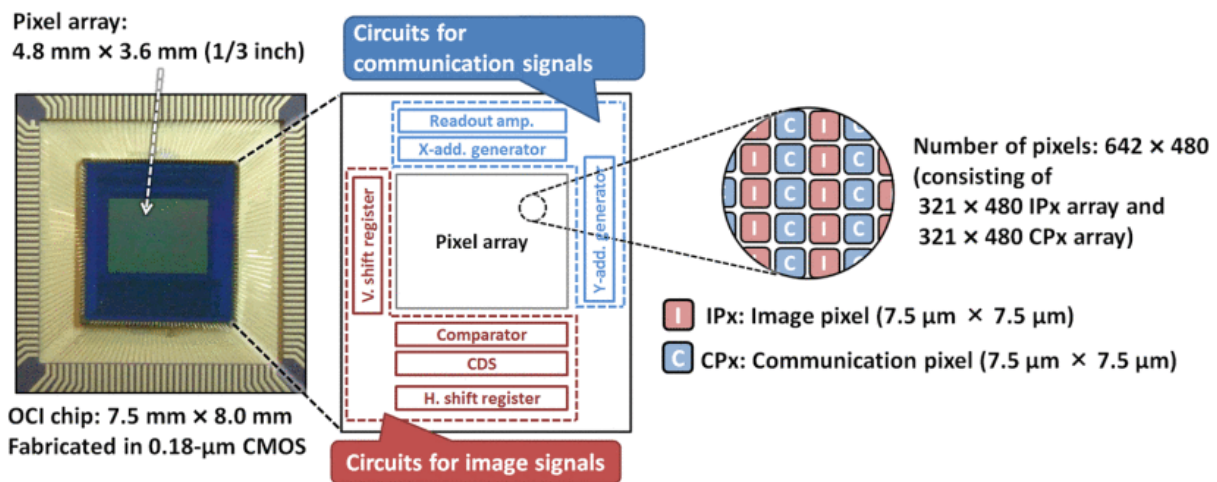


Рис 14. Фотографія та структура ОСІ.

На Рис. 15 показана вся робота ОСІ. По-перше, ОСІ видає два види зображень, захоплених масивом IPx. Один вид - це звичайне сіре зображення, а інший - 1-бітове сигнальне зображення для швидкого

виявлення світлодіодів. Сигнальне зображення робиться за дуже короткий час порівняно із сірим зображенням та бінаризується компараторними схемами в периферійних контурах для сигналів зображення. Тому об'єкти низької інтенсивності світла ідеально усуваються. На відміну від об'єктів високої інтенсивності світла, таких як світлодіоди, на сигнальному зображенні залишаються як "1". Якщо це сигнальне зображення використовується для детектування світлодіодів, час обчислення та швидкість неправильного виявлення значно скорочуються, оскільки більшість непотрібних об'єктів видаляються. Після доставки сигнального зображення до процесора зображення на зовнішньому блоці, світлодіодні області виявляються і центральні координати світлодіодних областей отримуються за допомогою основних методів обробки зображень. Далі отримані (x, y) -координати вводяться в X- і Y- генератори адреси ОСІ. Потім генератори адрес вибирають CPx, що відповідає введеним (x, y) - координатам, і вибраний CPx активується. Нарешті, оптичний сигнал, отриманий вибраним CPx, виводиться через підсилювачі зчитування в периферійні ланцюги для сигналів зв'язку. Вся ця операція повторюється безперервно, і тому оптичні сигнали високої швидкості надходять в той час як LED-передавач відслідковуються.

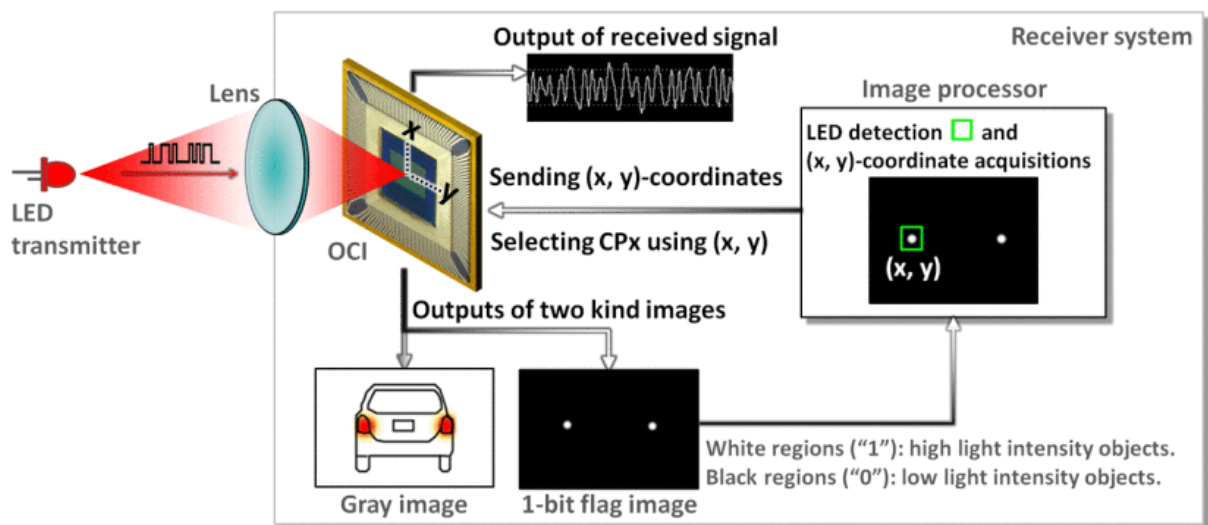


Рис.15 Як працює ОСІ

5.6 Системи світлодіодних передавачів та камери-приймача

На рис. 16 показана функціональна-схема системи світлодіодного передавача та приймача.

Система передавачів складається з блоку світлодіодного масиву та контролера, включаючи ПК. Контролер збирає різні дані для надсилання, і він пакує і кодує дані надсилання. Блок світлодіодного масиву має світлодіодні драйвери.

До системи приймача приєднано об'єктив камери. Оскільки оптичні фільтри не використовуються на лінзі, діапазон довжини хвилі, що приймається, є від видимого до світла NIR. ПК встановлює різні параметри для приймача камери та має прикладне програмне забезпечення для відображення отриманих даних, сигнальних зображень та сірих зображень. У приймальній системі сигнали сірого зображення та сигнальні зображення, що виводяться з ОСІ, будуються на кадрі пам'яті, і кожне зображення завершується в період до 16,6 мс (до 60 кадрів в секунду). У цій системі для відображення використовується сіре зображення. Сигнальне зображення доставляється до світлодіодного детектора, а LED області виявляються за допомогою типового методу маркування підключеного компонента протягом періоду до 16,6 мс. Дані координат x - y виявлених світлодіодів передаються до ОСІ, після чого CPx , що відповідає координатам (x, y) , активується. Оптичні сигнали, які були отримані активованим CPx , оцифровуються за допомогою АЦП 80-MSPS і вирівнюються за допомогою фільтра кінцевого імпульсного відгуку (FIR). Нарешті, зрівняні сигнали декодуються, а дані вибираються з пакетів.

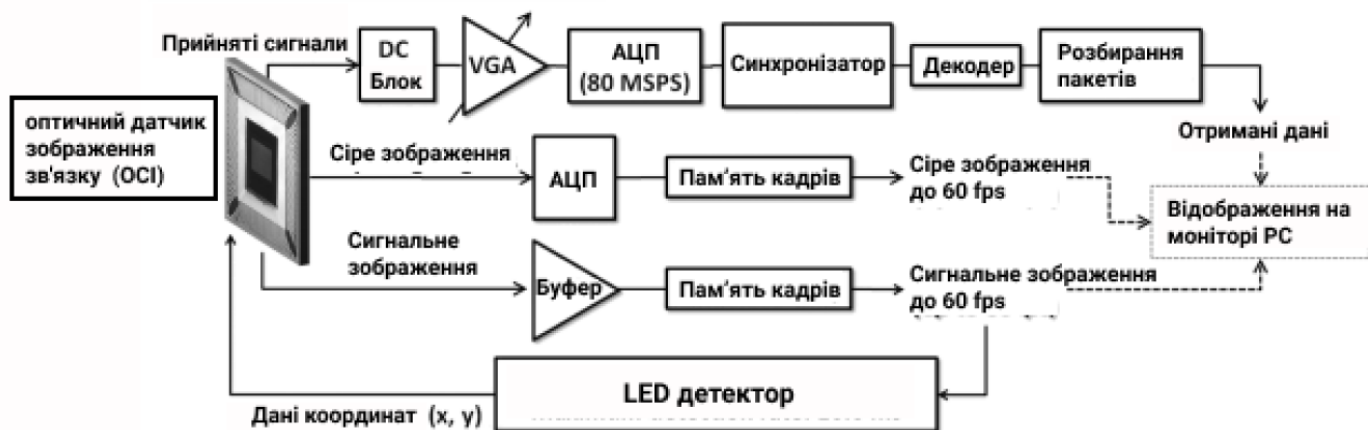
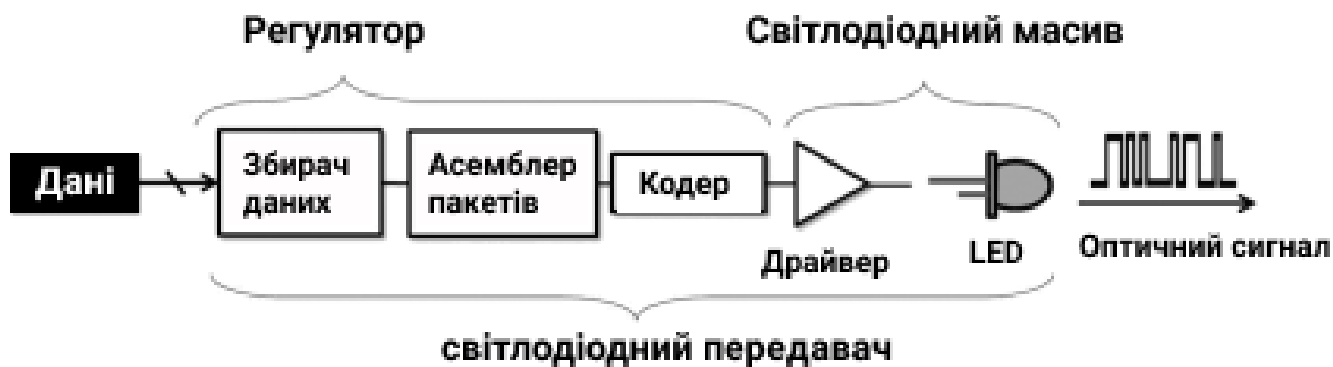


Рис.16 Функціональні схеми LED-передавача і приймача.

5.7 Оптична система зв'язку V2V

На Рис 17. показана блок-схема оптичної системи зв'язку V2V з використанням світлодіодних передавачів та камери-приймача.

Передній автомобіль (ПА) має два блоки світлодіодного масиву, контролер, включаючи ПК, та камеру переднього огляду для зйомки зображень з передньої частини ЗА, тобто зображень спереду. Контролер

збирає різні внутрішні дані автомобіля та зображення спереду (320 × 240, кольорове), а блоки світлодіодного масиву надсилають ці дані. Внутрішні дані транспортного засобу складаються з ідентифікатора транспортного засобу, світлодіодного ідентифікатора для ідентифікації лівої та правої сторони, швидкості руху транспортного засобу, робочих станів різних пристроїв (гальмо, небезпека, загоряння фари та лівих та лівих блимків) та даних про відстань між лівою і правої частини світлодіодного масиву. Два блоки світлодіодного масиву надсилають однакові дані, за винятком даних про ідентифікатор LED.

Зображення спереду стискається до зображення формату JPEG. Камера переднього виду може виводити зображення зі швидкістю до 20 кадрів в секунду. Однак швидкість передачі кадру зображення перегляду спереду автоматично регулюється залежно від часу експозиції камери переднього виду та розміру даних зображення JPEG. Згідно з попередніми дослідженнями, середня швидкість передачі кадру зображення переднього виду становить приблизно 15 кадрів в секунду в умовах денного освітлення і приблизно 10 кадрів в секунду в умовах нічного освітлення. Одне зображення перегляду спереду надсилається декількома пакетами, оскільки його розмір більший за розмір корисного навантаження пакету.

У задньому транспортному засобі (ЗА) є приймач камери та ПК. Приймач камери приймає оптичні сигнали та збирає внутрішні дані автомобіля ЗА. Отримані та зібрані дані доставляються на ПК, а доставлені дані аналізуються та відображаються на моніторі ПК.

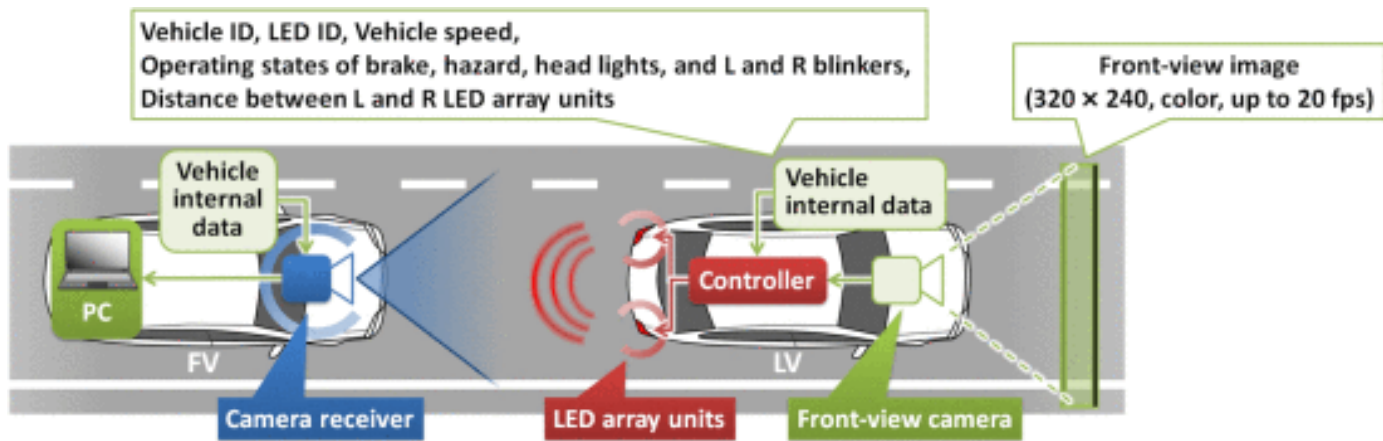


Рис. 17 Структурна схема оптичної системи зв'язку V2V.

Крім того, на ЗА нові дані обчислюються за допомогою отриманих даних та зображень прапора. Відносна швидкість між транспортними засобами обчислюється з різниці між швидкістю ПА і ЗА. Відстань L між транспортними засобами обчислюється за допомогою даних про відстань між лівими та правими одиницями світлодіодного масиву, як показано на Рис. 18 і обчислюється:

$$L = \frac{f}{a} \cdot \frac{D}{n}$$

де L - відстань між транспортними засобами, D - відстань між лівими та правими одиницями світлодіодного масиву, f - фокусна відстань об'єктива, n - відстань (тобто кількість пікселів) між лівим та правим світлодіодними масивами на зображення, a - розмір IPx. D надсилається від ПА, f і a - відомі значення у цій системі. Значення n легко знайти за допомогою простих технік обробки зображень. Таким чином, використовуючи як отримані дані, так і захоплене зображення, ця система забезпечує виконання не тільки однієї функції зв'язку між транспортними засобами, але і функцію обчислення діапазону.

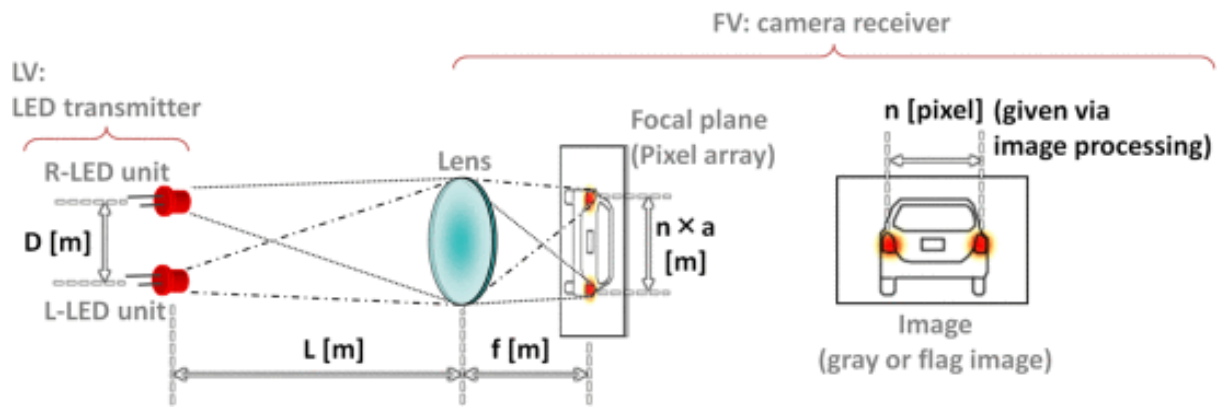


Рис 18. Метод вимірювання відстані між транспортними засобами.

Для підтвердження характеристик і можливостей цієї системи було проведено багато експериментів у центральних науково-дослідних лабораторіях Toyota в реальних умовах водіння і освітлення . Тестові випробування показали, що метод виявлення світлодіодів з використанням сигнального зображення ефективно усуває більшість непотрібних об'єктів на зображеннях і забезпечує правильне виявлення світлодіодів в режимі реального часу навіть в складних зовнішніх умовах. В експериментах з передачі даних передній автомобіль одночасно відправляв як набір даних про умови руху автомобіля (наприклад, ідентифікатор транспортного засобу і швидкість), так і потік даних кольорового зображення (320 × 240 пікселів) зі швидкістю до 20 кадрів в секунду. Вимірювання довели, що задній транспортний засіб отримав ці дані з прийнятною втратою пакетів, тобто потік зображення переднього виду приймається з коефіцієнтом ефективності 87% в денний час і 89% в нічний час.

На Рис. 19 показана фотографія реального прототипу оптичної системи зв'язку V2V. Блоки світлодіодного масиву прикріплені до лівої та правої сторони заднього скла переднього автомобілю. Камера переднього виду встановлена на панелі приладів переднього автомобілю. Приймач камери кріпиться на даху заднього автомобілю.

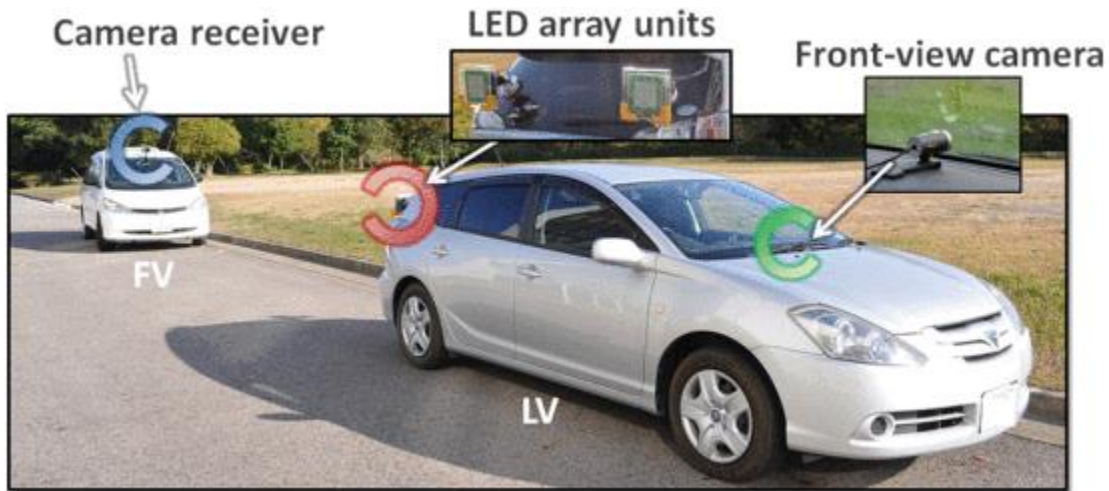


Рис.19. Прототип оптичної системи зв'язку V2V.

5.8 Висновок

У даному розділі були розглянуті різні практичні реалізації зв'язку VLC у інтелектуальних транспортних системах. Особлива увага приділена системі зв'язку V2V, заснованій на технології OWC, з'єднаній світлодіодними передавачами та камерою-приймачем. Світлодіодний передавач здатний передавати різні дані оптичними сигналами 10 Мб / с. Приймач камери оснащує спеціальний датчик зображення CMOS - ОСІ, який має масив СРх для швидкісного прийому оптичного сигналу та функцію виведення зображення прапора для полегшення виявлення світлодіодів у зовнішніх умовах. Використовуючи ОСІ, приймач камери отримав 10 Мбіт / с прийом оптичного сигналу та точні можливості детектування світлодіодів. Світлодіодні передавачі та камера-приймач із датчиком зображення ОСІ відповідно встановлені на ПА та ЗА.

Для підтвердження працездатності та потенціалу цієї системи було проведено багато експериментів у реальних умовах водіння та зовнішнього освітлення. Метод виявлення світлодіодів за допомогою сигнального зображення ефективно усуває більшість непотрібних об'єктів на зображеннях і забезпечує правильне і в режимі реального часу

детектування світлодіодів навіть у складних умовах зовнішнього середовища.

7. Висновки

У даній роботі була досліджена технологія Li-Fi – тип бездротового з'єднання, який може бути в 100 разів швидшим, ніж Wi-Fi. Використання світла для передачі даних дозволяє Li-Fi забезпечити багато переваг, таких як робота в районах, сприйнятливих до електромагнітних перешкод, лікарні та кабіни літака, робота на більш високій пропускну здатності, при цьому пропонуючи більш високі швидкості передачі.

Розглянута історія стандартизації Li-Fi, особлива увага приділялась стандарту IEEE 802.15.7 у якому розглядаються три класи пристроїв: інфраструктура, мобільні і транспортні засоби.

Була розглянута та проаналізована архітектура системи VLC.

У наступних розділах були досліджені практичні реалізації Li-Fi у інтелектуальних транспортних системах. Найбільш детально розглядалась практична реалізація V2V (зв'язок транспорту до транспорту). Також розглядалися проблеми впровадження технології Li-Fi та методи їх вирішення. Розроблені функціональні схеми передачі та прийому пакетів технології VLC у різних варіантах інтелектуальних транспортних систем.

За допомогою Li-Fi у недалекому майбутньому можна буде підвищити рівень безпеки та комфорту на дорогах.

За результатами даної роботи була опублікована стаття:

[1] Піталова М.Д., Мікляєв Г.О. “Багатовузлова мережа SDN з використанням технології Li-Fi”, Матеріали 14 МНТК «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2020 р.

Література

1. C. Chen, M. Ijaz, D. Tsonev, and H. Haas, "Analysis of downlink transmission in DCO-OFDM-based optical attocell networks," in Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Austin, TX, Dec 2014.
2. Y. Wang, X. Huang, L. Tao, J. Shi, and N. Chi, "4.5-Gb/s RGB-LED based WDM Visible Light Communication System Employing CAP Modulation and RLS based Adaptive Equalization," Optics Express, vol. 23, no. 10, pp. 13 626–13 633, May 2015
3. O.I. Romanov, Y. S. Hordashnyk, and T. T. Dong, "Method for calculating the energy loss of a light signal in a telecommunication Li-Fi system", International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), IEEE Conference Publications, Pages: 1-7, 2017;
4. Романов О.І., Федюшина Д.М., Донг Т.Т. Використання технології VLC для побудови мереж LI-FI та принцип її практичної реалізації. Матеріали 12-ої МНТК «Проблеми телекомунікацій», Київ, 2018 р. С 92-94.
5. Романов А.И., Федюшина Д.М., Донг Т.Т. Принцип построения беспроводной сети LI-FI и пути практической реализации // Матеріали 18 МНТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Одеса, 2018 р., С 223-225.
6. Nan Cen, Neil Dave, Emrecan Demirors, Zhangyu Guan. LiBeam: Throughput-Optimal Cooperative Beamforming for Indoor Visible Light Networks May 2019.
7. Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links," in Proc. 11th IEEE Int. Symp. PIMRC, 2000, vol. 2, pp. 1325–1329.
8. D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED based indoor visible light communications: State of the art," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, 3rd Quart. 2015.
9. H. Zhao, Y. Liu, K. Huang, X. Ji, and D. Wang, "A Study on Networking Scheme of Indoor Visible Light Communication Networks," in Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Seoul, South Korea, May 2014.
10. M.Y. Abualhoul et al., Enhancing the field of view limitation of Visible Light Communication-based platoon, in 2014 IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC), Sep 2014, pp. 1–5. doi:10.1109/WIVEC.2014.6953221