



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

**“COMUNICAZIONI WIRELESS PER APPLICAZIONI AUTOMOTIVE”**

**Relatore: Prof. STEFANO VITTURI**

**Laureando/a: ERNESTO DE NITTO**

**ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022**

**25 novembre 2022**



## SOMMARIO

Le reti wireless stanno diventando sempre più diffuse, affidabili ed efficienti, estendendo il loro impiego anche nel settore automotive. In questo testo viene data una panoramica dei diversi protocolli di comunicazione wireless studiati e utilizzati dall'industria automobilistica e dei loro principali ambiti applicativi: sicurezza e gestione del traffico, controllo di parti dell'autoveicolo e dei sensori, servizi di infotainment (i.e. information and entertainment). Particolare attenzione viene data alle comunicazioni di sicurezza che utilizzano DSRC e C-V2X, nelle radio frequenze, e VLC, nello spettro visibile. In seguito viene presentata una tecnologia ad uso più generale: Bluetooth Low Energy. Infine, viene illustrato il funzionamento di Ultra Wide-Band, usato principalmente per applicazioni di posizionamento e localizzazione.



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>1 – SISTEMI DI TRASPORTO INTELLIGENTI: ITS</b>	<b>4</b>
1.1 Physical Layer	5
1.2 MAC Layer	7
1.3 Network e Transport Layer	9
1.3.1 Comunicazione sul CCH	9
1.3.2 Comunicazione sul SCH	10
1.4 Layer superiori	10
1.5 C-V2X	11
1.6 Confronto delle prestazioni	13
1.7 Evoluzioni future: IEEE 802.11bd e NR V2X	14
1.8 Soluzioni ibride	16
<b>2 – VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS: VLC</b>	<b>18</b>
2.1 Standardizzazione	18
2.2 Implementazioni, problemi applicativi e possibili soluzioni	19
<b>3 – INFOTAINMENT</b>	<b>22</b>
<b>4 - BLUETOOTH LOW ENERGY: BLE</b>	<b>23</b>
4.1 Tipi di Bluetooth e di dispositivi	25
4.2 Consumo di potenza	26
4.3 Sicurezza	27
4.4 Robustezza e affidabilità	28
<b>5 - ULTRA WIDEBAND: UWB</b>	<b>30</b>
5.1 Physical Layer	31
5.1.1. Struttura del frame	32
5.2 MAC Layer	34
5.3 Tecniche di localizzazione	35
5.3.1 Time of Flight (ToF)	35
5.3.2 Time Difference of Arrival (TDoA)	36
5.3.3 Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR)	37
5.3.4 Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)	38
5.3.5 Angle of Arrival (AoA)	39
5.4 Setup della comunicazione	40
5.5 Evoluzioni future: IEEE 802.15.4ab	41
<b>CONCLUSIONE</b>	<b>42</b>
<b>FONTI</b>	<b>44</b>



## INTRODUZIONE

Lo sviluppo di tecnologie wireless sempre più veloci e sempre più affidabili ha permesso la loro diffusione massiccia in ogni ambito industriale. Già da molto tempo esse vengono impiegate nel settore automotive: si pensi semplicemente ai sistemi di autoradio o, più recentemente, ai sistemi di navigazione satellitare e dispositivi per il pagamento dei pedaggi. Le prestazioni sempre più elevate oggi raggiunte permettono nuove possibilità ed applicazioni e l'impiego di reti wireless negli autoveicoli è in continuo ampliamento.

Il Regolamento UE 2019/2144 del 27 novembre 2019 del Parlamento Europeo sui requisiti dei veicoli a motore e delle loro componenti, prevede che dal 2024 tutte le auto debbano essere dotate, tra gli altri, dei seguenti dispositivi [1]:

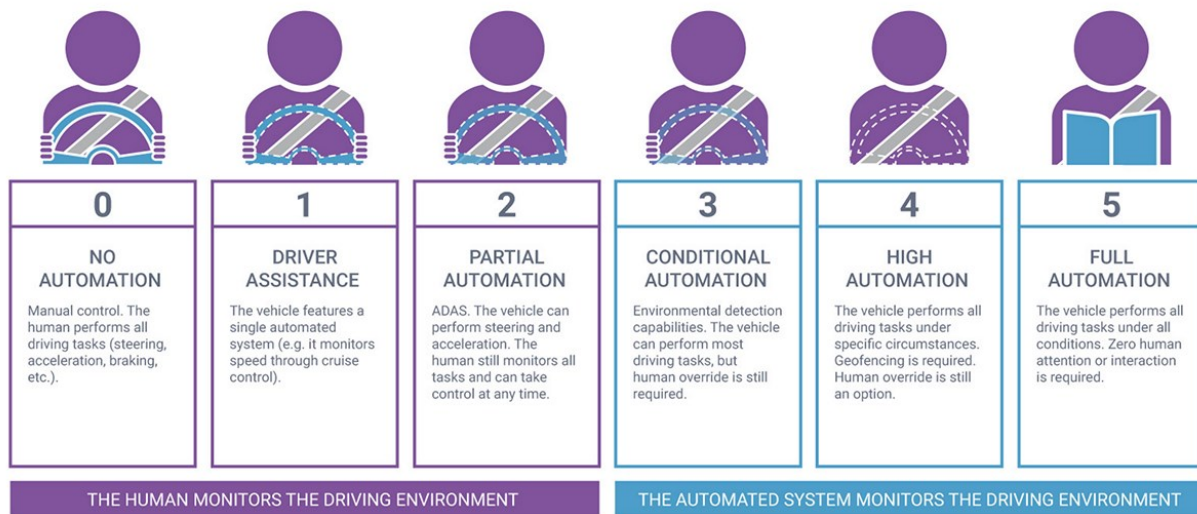
- il controllo adattivo della velocità di crociera (Adaptive Control Cruise) che mantiene la distanza tra un veicolo e l'altro;
- il posizionatore del veicolo al centro della corsia (Lane Positioning Assist) che riconosce le linee di carreggiata e avverte in caso di pericolo;
- la frenata automatica di emergenza, Braking Assistance System;
- i sistemi di rilevamento di stanchezza e distrazione del guidatore come il Driver Attention Alert.

Alcuni modelli di cruscotto intelligente, quale l'Audi Virtual Cockpit, sono già dotati di tecnologia Break Warning: i sensori collegati allo sterzo e ai pedali riescono ad avvertire il computer di bordo di eventuali segni di stanchezza del conducente, e attivano segnali di allarme per richiamare la sua concentrazione ed evitare incidenti.

Integrare dispositivi elettronici così sofisticati richiede un apparato di comunicazione sempre più grande ed esteso: per questo motivo le automobili arrivano a contenere interi chilometri di cavi, che costituiscono un costo e complicano il cablaggio all'interno del veicolo. Le comunicazioni wireless possono svolgere un ruolo fondamentale da questo punto di vista. Inoltre, non essendoci la possibilità di rotture fisiche dei collegamenti, risultano anche di più semplice manutenzione.

Particolarmente interessante è l'ambito di ricerca che si occupa delle comunicazioni wireless da veicolo a veicolo (V2V) e da veicolo a infrastruttura (V2I). Questo tipo di comunicazioni può essere utilizzato per realizzare sistemi di trasporto intelligenti, indicati in letteratura come Intelligent Transportation Systems (ITS), non solo per assistere il guidatore in una guida più sicura, ma anche per facilitare la realizzazione della guida autonoma. Si stima che entro il 2025 circoleranno in strada approssimativamente 8 milioni di veicoli autonomi o semi-autonomi [2].

La Society of Automotive Engineers (SAE) ha definito 6 livelli di guida automatica che vanno da 0, completamente manuale, a 5, completamente automatica, come descritto in figura 1.



**Fig. 1 - Livelli di automazione SAE [3].**

E se l'idea della guida autonoma può sembrarci ancora futuristica, questa invece è già realtà: in alcune città della Cina (e.g. Pechino) e degli Stati Uniti (e.g. San Francisco) sono stati attivati nei primi mesi di quest'anno servizi di robotaxi, ovvero taxi a guida autonoma, sebbene sia ancora presente un supervisore alla guida [4]. Ancor più di recente (agosto 2022) un servizio di robotaxi senza supervisione è stato attivato a Wuhan [5].

Attraverso una connessione wireless, che permette e facilita la comunicazione tra veicoli e tra questi ultimi e le infrastrutture stradali, il guidatore può quindi accedere a informazioni di diversa natura in tempo reale: dalla localizzazione di parcheggi disponibili alle condizioni del traffico o quelle meteorologiche e molto altro ancora. La connettività tra veicoli ed infrastrutture quali semafori, centri di gestione del traffico o cartelli a messaggio variabile consentirà di aumentare in misura significativa la sicurezza stradale, l'efficienza del traffico e il comfort di guida.

Un'altra interessante applicazione in fase di sviluppo delle comunicazioni interveicolari è il "platooning": pensato principalmente per i camion, consiste nella formazione di gruppi di veicoli che viaggiano vicini tra loro con vincoli stretti di distanza e velocità. Solo la prima vettura è guidata realmente, mentre le altre la seguono in maniera pressoché autonoma. Tutti i veicoli sono collegati tra loro da un "gancio di traino" elettronico che utilizza la comunicazione da veicolo a veicolo, dove il camion di fronte imposta la velocità e la direzione. Ciò consente



di ridurre la congestione stradale, aumentare l'efficienza nel consumo del carburante (con conseguente riduzione dei costi e dell'inquinamento ambientale) e diminuire lo stress del guidatore [6] [7].

La rivoluzione dei veicoli connessi avrà, dunque, un grande impatto sul mondo della mobilità. Grazie a queste nuove tecnologie, le strade diventeranno più scorrevoli e sicure, sia per i pedoni che per gli automobilisti.

L'obiettivo di questo documento è illustrare la recente tecnologia a supporto di queste trasformazioni nel settore dell'automotive, proponendo un confronto tra possibili alternative, cercando di evidenziare vantaggi e criticità delle diverse soluzioni.

Nel primo capitolo vengono presentate e confrontate le due tecnologie di comunicazione radio più rilevanti negli ambiti della sicurezza e della gestione del traffico (DSRC e C-V2X), e sono illustrati i loro futuri sviluppi; nel secondo capitolo è presentata una tecnologia, anch'essa applicata in ambito di sicurezza, ma che opera nello spettro del visibile (VLC); il terzo capitolo illustra in modo generale un'applicazione di particolare interesse per i consumatori: l'infotainment; il quarto capitolo presenta una tecnologia di grande interesse grazie ai suoi meriti in ambito di consumo di potenza: Bluetooth Low Energy; infine, nel quinto capitolo, viene presentata una tecnologia che ha iniziato ad essere ampiamente utilizzata negli ultimi anni nel settore automotive per scopi di localizzazione e posizionamento: Ultra Wide-Band.

## 1 – SISTEMI DI TRASPORTO INTELLIGENTI: ITS

In Europa gli incidenti stradali sono la prima causa di morte nei giovani di età compresa tra i 5 e i 29 anni e hanno un impatto sulle economie dei singoli Paesi superiore al 3% del prodotto interno lordo [8].

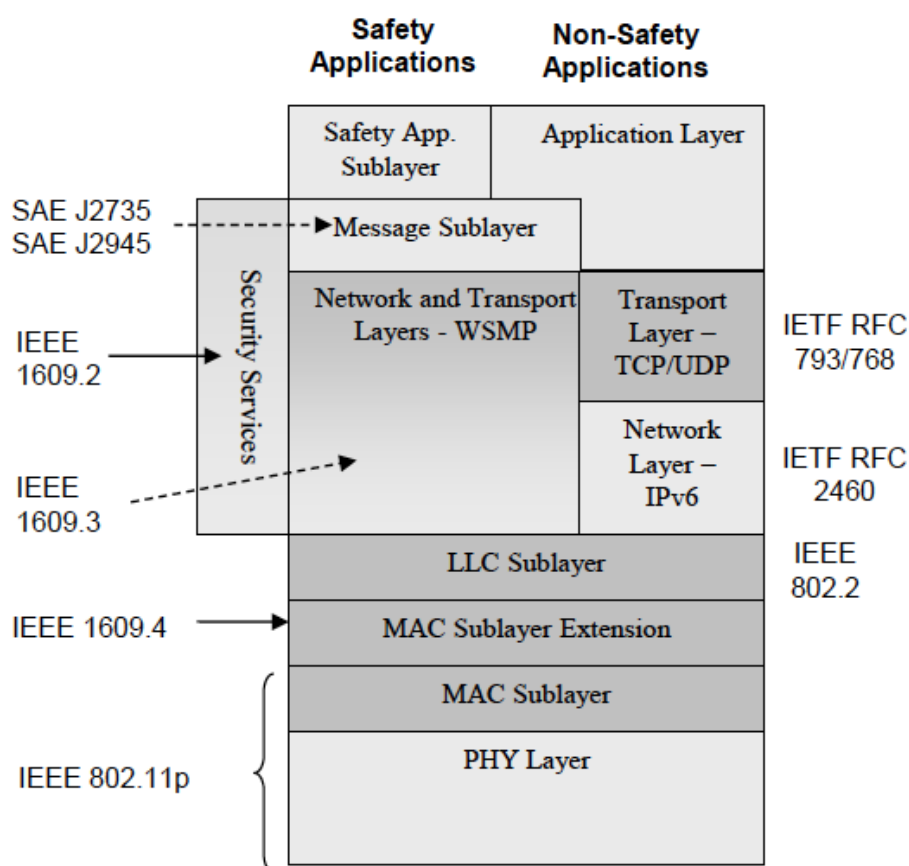
Agenzie governative e l'industria automobilistica puntano a migliorare la sicurezza stradale. Un progetto promettente riguarda la comunicazione tra veicoli *e/o* con altri tipi di dispositivi stradali, consentendo la condivisione di informazioni importanti. Inoltre, è possibile che questa comunicazione possa coinvolgere anche altri dispositivi "smart" come i cellulari, grazie ai quali i guidatori potrebbero essere avvertiti della presenza di un ciclista sulla strada o di un pedone che sta attraversando, riducendo di parecchio il rischio di incidenti.

Nel 1999 la Federal Communications Commission (FCC), l'agenzia statunitense che regola le telecomunicazioni, ha allocato la banda da 5.850 GHz a 5.925 GHz (5.9 GHz band) per lo sviluppo di Intelligent Transportation Systems (ITS), termine che in seguito è stato formalmente definito nella direttiva del parlamento europeo 2010/40/EU.

Oltre alla sicurezza stradale, un'altra importante applicazione degli ITS è il controllo del traffico: con le informazioni ricevute è possibile avere un'idea chiara ed in tempo reale delle condizioni di traffico, fornendo ai guidatori mappe sempre aggiornate. Ciò contribuirebbe a diminuire rallentamenti e blocchi stradali, con notevole risparmio di tempo nei trasferimenti e meno inquinamento dovuto alle emissioni di veicoli fermi.

A parte alcuni dettagli che dipendono da problemi di regolamentazione locale, questi sistemi utilizzano lo standard IEEE 802.11p per i layer MAC e PHY, mentre per i layer più alti vengono utilizzati gli standard della famiglia 1609 per Wireless Access for Vehicular Environments (WAVE), o simili. Il progetto principale basato su questi protocolli è detto DSRC: Dedicated Short-Range Communication. Questo sistema utilizza On-Board Units (OBUs), ossia ricetrasmittitori installati sul veicolo (talvolta possono essere dispositivi portatili), e Roadside Units (RSUs), ricetrasmittitori installati lungo la strada o sul marciapiede. Una RSU può inviare dati in maniera broadcast verso le OBU o scambiare dati con esse.

Lo stack di protocolli per gli ITS è riportato in figura 2.



**Fig. 2 - Stack di protocolli per ITS (DSRC/WAVE) negli Stati Uniti [9].**

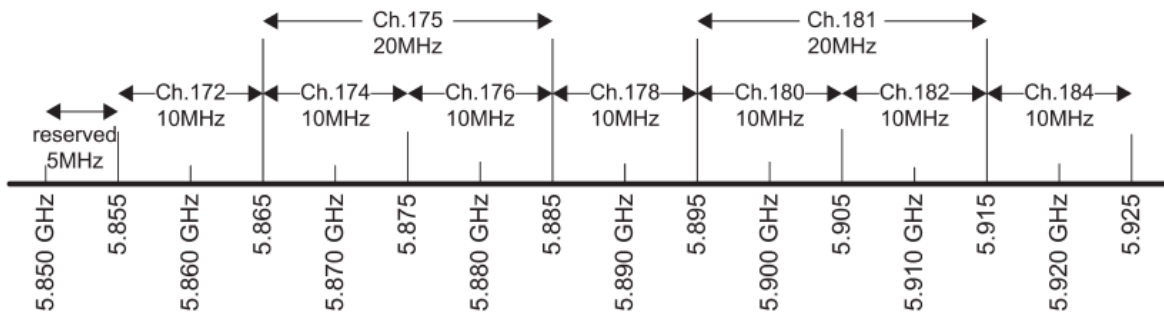
### 1.1 Physical Layer

Il layer PHY è descritto nel protocollo IEEE 802.11p; questo si basa sul meccanismo di Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) e supporta diversi rate di dati a seconda del tipo di modulazione e della codifica utilizzati.

Come già detto, la banda allocata dalla FCC per questo servizio negli Stati Uniti è la banda da 5.850 GHz a 5.925 GHz, i cui 75 MHz sono suddivisi in canali, ciascuno da 10 MHz, come mostrato in figura 3. Il canale 178 è denominato control channel (CCH), mentre gli altri canali sono detti service channels (SCH). Il canale 172 è stato riservato dalla FCC per comunicazioni tra veicoli dedicate ad applicazioni di sicurezza per evitare incidenti stradali o mitigarne gli effetti. Il canale 184 è stato riservato per comunicazioni ad alta potenza per la pubblica sicurezza. I canali 174 e 176 possono essere combinati in un unico canale di 20 MHz, il canale 175. Analogamente i canali 180 e 182 si possono unire nel canale 181. Questi canali potrebbero

essere usati in situazioni statiche (ad esempio ad una stazione di rifornimento) per il download di mappe o contenuti multimediali.

In Europa la suddivisione della banda è sostanzialmente analoga.

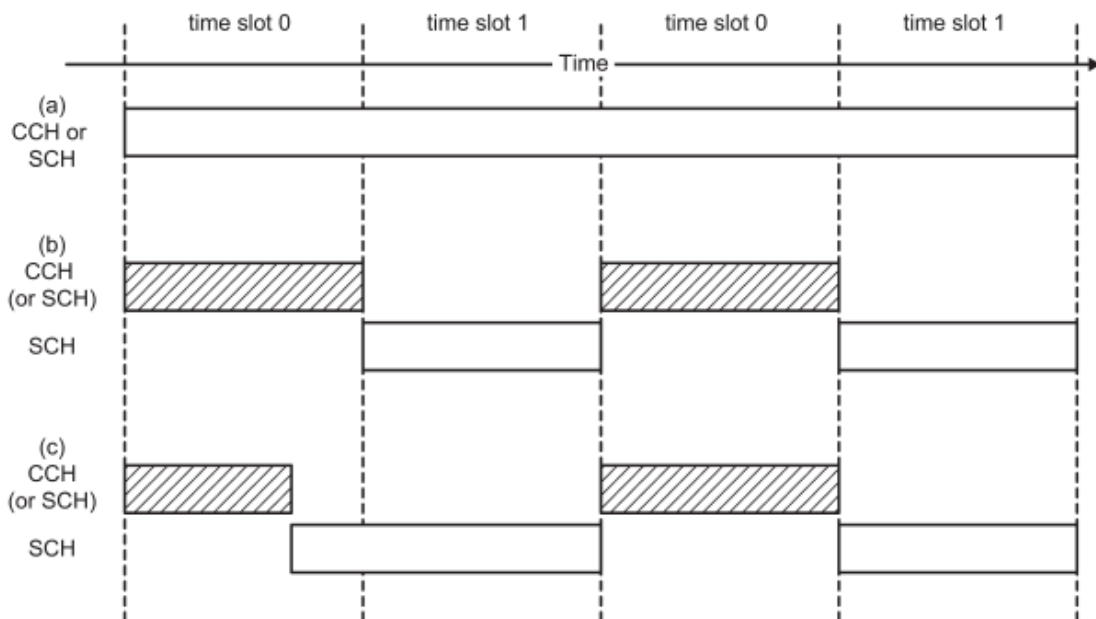


**Fig. 3 - Allocazione dei canali di FCC [10].**

Per quanto riguarda i dispositivi, questi si suddividono in dispositivi con connessioni fisiche multiple (multi PHY) – che lavorano tipicamente sul CCH ed almeno un SCH - e dispositivi a connessione fisica singola – che possono alternare CCH e SCH. Vi sono tre tipi di accesso ai canali:

- accesso continuo: il dispositivo lavora unicamente sul CCH;
- accesso alternato: il dispositivo opera nel SCH nello slot di tempo dedicato al SCH e nel CCH nello slot dedicato al CCH;
- accesso immediato o esteso: il dispositivo opera nel SCH sia nello slot apposito che in quello dedicato al CCH.

IEEE 802.11p utilizza 52 sottoportanti che possono utilizzare vari schemi di modulazione, tra cui BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Inoltre, utilizza codici di Forward Error Correction (FEC) con code rate di 1/2, 2/3 o 3/4. Le capacità di canale supportate vanno dai 3 ai 27 Mbps.



**Fig. 4 - Opzioni di accesso al canale; (a) continuo, (b) alternato e (c) immediato [10].**

## 1.2 MAC Layer

Al layer MAC, per consentire comunicazioni a bassa latenza e bypassare la lunga procedura di configurazione di un Basic Service Set (BSS) richiesta dai tradizionali protocolli 802.11, IEEE 802.11p utilizza regole meno complesse chiamate “Outside the Context of a BSS” (OCB), che permettono ai nodi di trasmettere segnali senza previa associazione. 802.11p ha ereditato da 802.11e la funzione Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), che definisce diversi livelli di priorità dei pacchetti (Access Categories, AC). Questa si basa sul meccanismo di Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), in cui un nodo ascolta il canale prima della trasmissione. Se il canale è percepito come inattivo per un periodo di ascolto predeterminato (Arbitration Interframe Space, AIFS), il nodo inizia a trasmettere un pacchetto immediatamente. Se il canale è percepito come occupato durante l’AIFS, il nodo segue una procedura di backoff casuale basata su un contatore di backoff, che è impostato ad un valore intero estratto da una distribuzione uniforme nell’ intervallo  $[0, CW]$ , dove  $CW$  è un valore detto Contention Window. Il contatore di backoff viene decrementato dopo ogni AIFS e quando raggiunge lo zero, il nodo cerca di ritrasmettere il pacchetto. Normalmente in CSMA/CA viene utilizzata la procedura di backoff esponenziale, ossia ogni volta che la trasmissione fallisce, il parametro  $CW$  raddoppia: ciò può portare a latenze elevate. Per risolvere questo problema, in 802.11p questo parametro è fissato a un valore costante. EDCA

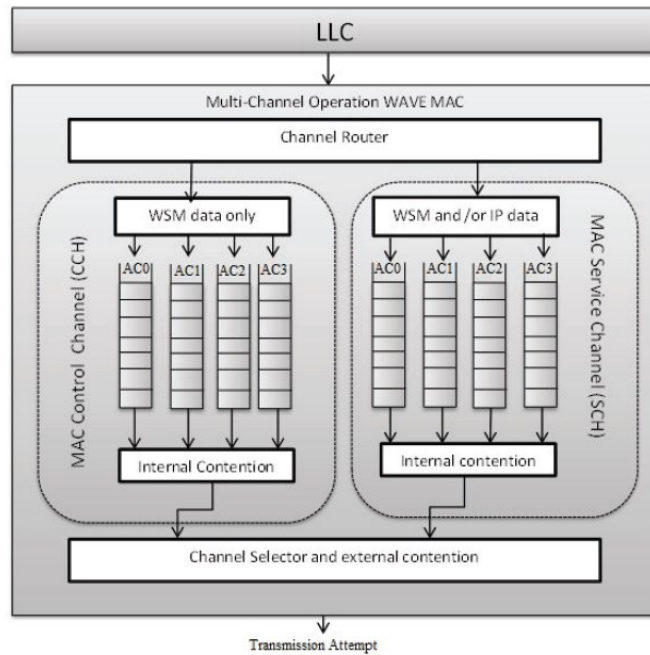
assegna al traffico appartenente a diversi livelli di priorità, AC, diversi parametri per l'accesso al canale, fra cui CW e AIFS, in modo che i pacchetti a priorità maggiore possano essere trasmessi più velocemente.

Inoltre, poiché la comunicazione in DSRC è prevalentemente broadcast non vengono utilizzati meccanismi di acknowledgement.

WAVE lavora con tre tipi di frame:

- frame di controllo, come in 802.11;
- management frame, che possono essere del tipo time advertisement (TA), usati per la sincronizzazione, o Vendor Specific Action (VSA). Questo tipo di frame può essere trasmesso sia su CCH che SCH;
- data frame, che possono essere di tipo WSMP (acronimo che sarà illustrato nel paragrafo successivo) o IP. I frame WSMP che contengono WAVE service messages (WSM) possono essere trasmessi sia su CCH che SCH, mentre i frame IP possono essere trasmessi unicamente su SCH.

In figura 5 è rappresentato lo schema del MAC multi-canale, che contiene sia SCH che CCH. Per gestire le priorità dei dati vengono utilizzate delle code. Quando dei dati sono ricevuti dal Logical Link Control (LLC), viene controllato il campo ethertype nell'header: se è di tipo WSMP, verrà indirizzato alla coda appropriata in base all'identificatore di canale e alla priorità del messaggio. Se invece il datagram è di tipo IP, questo viene registrato nel Management Information Base (MIB), che contiene il numero del SCH, livello di potenza ed il rate di dati. Il datagram viene quindi inviato dal channel router al buffer che corrisponde al corretto SCH. In questo modo, i layer più alti possono controllare i parametri di trasmissione del physical layer. Il selettore di canale ha molte funzioni, tra cui scartare i dati quando il canale non è più attivo.



**Fig. 5 - Architettura del MAC di un dispositivo WAVE multicanale [11].**

### 1.3 Network e Transport Layer

Il network layer è descritto dallo standard IEEE 1609.3, nel quale viene definito il WAVE Short Message Protocol (WSMP). Questo protocollo è stato progettato con lo scopo di ottenere comunicazioni particolarmente veloci ed affidabili, che possano essere utilizzate per applicazioni in ambito di sicurezza. Alla ricezione di un WAVE short message dai layer superiori viene generato un WSMP header, LLC imposta l'ethertype ed incapsula il pacchetto, passandolo al layer inferiore.

Gli standard WAVE supportano anche i protocolli UDP/TCP/IP. Il traffico di dati IP viene gestito dal LLC.

#### 1.3.1 Comunicazione sul CCH

Sul CCH è ammesso solo traffico WSMP e di controllo. I WSM possono essere unicast, multicast o broadcast, e possono essere ricevuti da qualunque dispositivo WAVE nelle vicinanze al momento della trasmissione. La comunicazione sul CCH può essere utilizzata, ad esempio, per ottenere informazioni di temporizzazione da dispositivi WAVE vicini. In questo caso, il dispositivo che effettua la richiesta invia un messaggio in broadcast tramite WSMP, ed un dispositivo può rispondere con un Timing Advertisement management frame, unicast o broadcast

### *1.3.2 Comunicazione sul SCH*

Diversi servizi, pubblicizzati o meno, possono utilizzare lo stesso SCH nello stesso luogo e nello stesso momento. Operare su un SCH occupa le risorse fisiche di un dispositivo PHY, ovvero una radio PHY lavora su un canale radio alla volta.

Nel caso di servizi non pubblicizzati, le applicazioni possono comunicare utilizzando un SCH predefinito. L'utilizzo di un SCH per uno scopo particolare può essere preconfigurato o determinato tramite altri meccanismi. Qualunque dispositivo WAVE sintonizzato sul corretto canale partecipa a questo servizio, il che non implica alcun ruolo specifico (client, server, trasmettitore o ricevitore) nell'applicazione. Ne sono un esempio le comunicazioni di sicurezza sul canale 172: in questo caso il canale 172 è preconfigurato come "safety channel" in tutti i dispositivi. Protocolli all'application layer determinano i messaggi trasmessi in broadcast periodicamente o automaticamente al verificarsi di un determinato evento.

Nel caso di servizi pubblicizzati un dispositivo assume il ruolo di provider. Il provider trasmette un WAVE service advertisement (WSA) message che identifica e descrive il servizio "pubblicizzato" ed indica il SCH su cui verrà fornito.

In questo scenario il dispositivo utente controlla il CCH in attesa di WSA durante il time slot 0 e partecipa ad eventuali servizi nel SCH indicato dal WSA durante il time slot 1.

## **1.4 Layer superiori**

Lo standard SAE J2735 definisce un set di messaggi, data-frames e data-elements che possano essere utilizzati da applicazioni per sistemi WAVE/DSRC nella comunicazione da veicolo a veicolo (V2V) e nella comunicazione da veicolo ad infrastruttura (V2I). In particolare include le seguenti categorie di messaggi: generali, di sicurezza, geolocalizzazione e pagamenti elettronici [10].

Mentre la comunicazione WAVE utilizza i numeri di porta per protocolli basati su IPv6 (e.g. TCP, UDP), WSMP utilizza il PSID, o Provider Service Identifier. Questo indica un'entità all'application layer sul dispositivo ricevente a cui devono essere consegnati i dati del WSM.

### **Esempio di connettività ad internet**

Un sistema WAVE può supportare applicazioni generali basate su IPv6 come illustrato nell'esempio seguente: una RSU è connessa ad internet e configurata come Provider per trasmettere un WSA che segnala un servizio generico di accesso ad internet (attraverso lo PSID di "IPv6 routing" in un'istanza di Service Info). Il WSA include un WRA (WAVE routing advertisement), così come sul servizio e sul canale. Il WRA contiene le informazioni necessarie ad un OBU per accedere ad internet, senza bisogno di un Internet Control Message Protocol

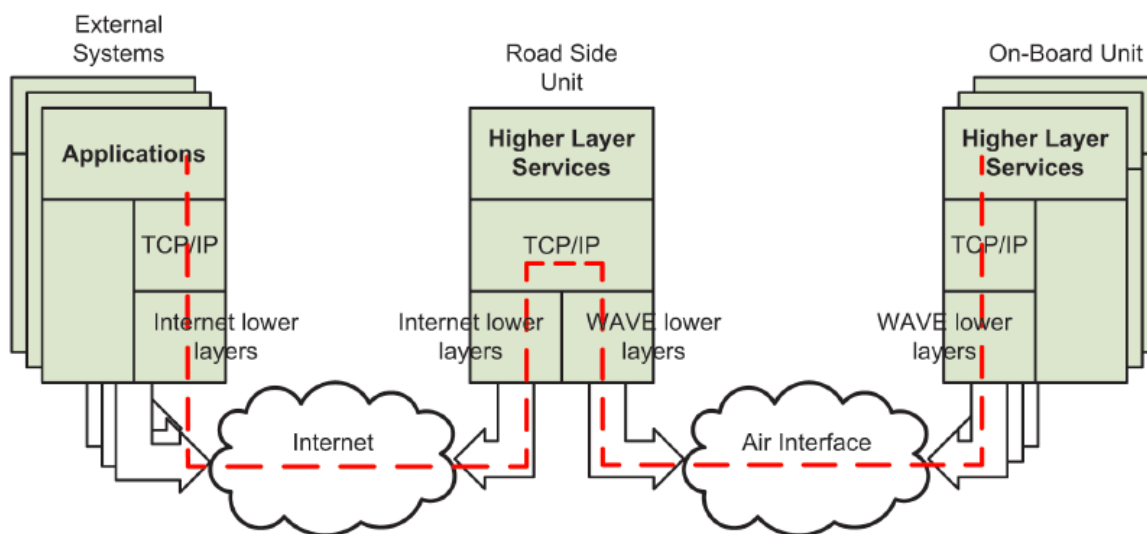


per IPv6 (ICMPv6) Router Advertisement. In questo scenario, tipicamente i WSA sarebbero trasmessi sul CCH e le comunicazioni IPv6 avverrebbero su SCH.

Va evidenziato che servizi di accesso ad internet non dovrebbero essere forniti su un SCH dedicato alla sicurezza. Basandosi sulle informazioni ricevute nel WRA, la OBU configura lo stack di IPv6 ed è in grado di accedere ad internet utilizzando come gateway la RSU, come illustrato in figura 6. Questo metodo permette ad applicazioni che richiedono bassa latenza di configurare IPv6 senza utilizzare meccanismi di ricerca che allungherebbero i tempi.

Il primo protocollo application-level della famiglia 1609 è 1609.11 (Over-the-air electronic payment data exchange protocol for its), descrive un protocollo per il pagamento utilizzando i modelli ISO.

IEEE 1609.2 (Security services for applications and management messages) descrive le modalità di messa in sicurezza delle comunicazioni per WAVE Service Advertisements e WAVE Short Messages, oltre a servizi di sicurezza aggiuntivi che possono esser forniti a layer superiori. Tra i vari meccanismi uno coinvolge l'utilizzo dello PSID.



**Fig. 6 - Esempio di accesso ad internet [10]**

## 1.5 C-V2X

Per molti anni DSRC/WAVE è stata l'unica tecnologia disponibile per comunicazioni vehicle-to-everything (V2X), e nel 2017, dopo un lungo periodo di test, ha cominciato ad essere implementata in alcuni modelli di auto. Di recente però ha cominciato a farsi strada una nuova

tecnologia basata sulla comunicazione cellulare: C-V2X, introdotta dalla società di standardizzazione 3GPP nella Release 14 (pubblicata nel 2017), il cui grande vantaggio è che può sfruttare l'infrastruttura già esistente per le comunicazioni cellulari e comunicare anche con dispositivi quali smartphone.

Tuttavia, poiché la copertura dell'infrastruttura non può essere sempre garantita, C-V2X definisce modalità di trasmissione che consentono comunicazioni V2X dirette utilizzando il canale detto sidelink, tramite l'interfaccia PC5. 3GPP Rel. 14 ha introdotto due nuove modalità di comunicazione sul sidelink (modalità 3 e 4) per supportare comunicazioni V2X a bassa latenza.

La struttura delle risorse nei domini del tempo e della frequenza è sostanzialmente quella di LTE: i canali di 10 o 20 MHz sono suddivisi in sotto-canali nel dominio della frequenza e in sotto-segmenti (intervalli di tempo di trasmissione di 1 ms) nel dominio del tempo. I sottocanali sono ulteriormente divisi in Resource Blocks (RB). Un RB con banda di 180 KHz (che include 12 sottoportanti di 15 KHz ciascuna) è la più piccola unità di risorsa che può essere allocata ad un utente LTE. Ogni sotto-canale è definito come un gruppo di numero variabile di RB nello stesso sotto-segmento. I dispositivi C-V2X possono trasmettere sulle sottoportanti con le modulazioni Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) o 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) con turbo codifica (codice di correzione degli errori) [12] [13].

C-V2X utilizza due tipi di interfaccia: LTE-Uu, l'interfaccia tradizionale che comunica con le stazioni base cellulari, e PC5, l'interfaccia per la comunicazione diretta fra dispositivi. Un pacchetto trasmesso utilizzando l'interfaccia PC5 è costituito da una componente di dati e da una componente di informazioni di controllo, detta Sidelink Control Information (SCI), comprendente lo schema di modulazione e di codifica (MCS) usato, le risorse occupate dalla trasmissione corrente e da quelle future. Il canale utilizzato per trasmettere l'SCI è chiamato Physical Sidelink Control Channel (PSCCH), mentre quello utilizzato per trasmettere i dati è detto Physical Sidelink Shared Channel (PSSCH). In C-V2X, PSCCH e PSSCH sono multiplati in frequenza, ovvero trasmettono su risorse di frequenza diverse nello stesso sotto-segmento di tempo, adiacenti o non adiacenti.

Nella Release 14 sono state introdotte due modalità di comunicazione sul sidelink, progettate esplicitamente per le comunicazioni V2X:

- LTE PC5 mode 3: supporta comunicazioni broadcast direttamente fra i veicoli, ma l'allocazione delle risorse per la comunicazione è svolta dalla rete, il che richiede che i veicoli si trovino in copertura radio di una stazione base cellulare;
- LTE PC5 mode 4: supporta comunicazioni broadcast direttamente fra i veicoli. In questo caso, l'allocazione delle risorse per la comunicazione è svolta autonomamente da

ciascun veicolo, senza il bisogno della copertura radio di una stazione base cellulare. Per questo motivo è la modalità più utilizzata per determinare le prestazioni di C-V2X e per i confronti con DSRC. L'allocazione autonoma delle risorse impiega un algoritmo chiamato SB-SPS (Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling) [14].

È bene notare che mentre l'algoritmo di gestione delle risorse di DSRC è basato sulla contesa, quello di C-V2X è ad accesso programmato, basato sulla "prenotazione" delle risorse.

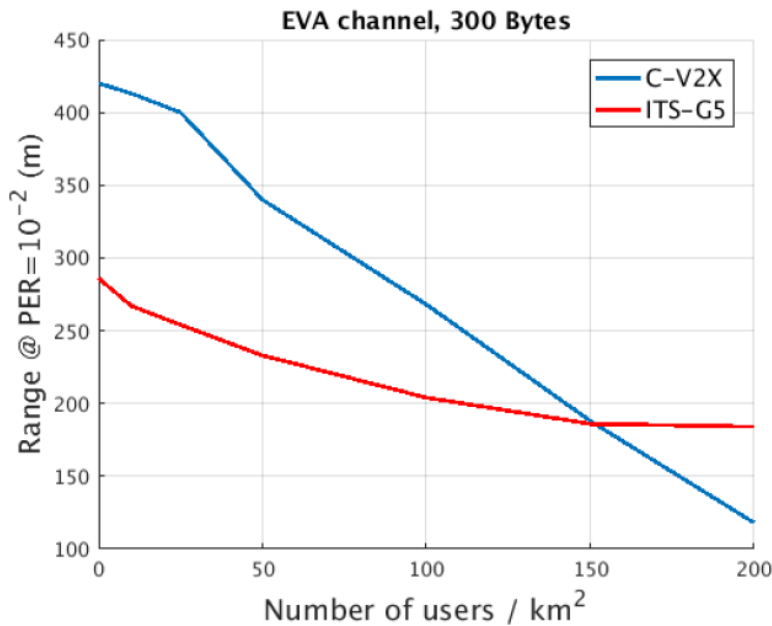
## 1.6 Confronto delle prestazioni

Mentre DSRC è una tecnologia che è stata ampiamente testata e anche implementata in autovetture in commercio, la più recente C-V2X è stata principalmente studiata attraverso simulazioni ed in laboratorio. In molti articoli le due tecnologie vengono confrontate, sebbene sia difficile ottenere una comparazione esaustiva sia per il numero di parametri da controllare, che per la varietà di situazioni da considerare.

In [15] viene simulato il funzionamento di queste due tecnologie nello scenario di un'autostrada congestionata, con traffico che procede alla velocità media di 50 km/h. Dai risultati ottenuti si nota che LTE-V2V può migliorare del 10% il tasso di ricezione dei pacchetti rispetto a IEEE 802.11p. Tuttavia, questo risultato si ottiene solo con un basso volume di traffico dati. La situazione cambia se si assume una maggiore dimensione dei pacchetti scambiati. In questo caso LTE-V2V risulta ancora il più performante per quanto riguarda la ricezione dei pacchetti (con un massimo miglioramento del 26%), mentre per quanto concerne il ritardo di aggiornamento, questo risulta minore usando 802.11p.

IEEE 802.11p raggiunge ottime prestazioni su distanze di alcune centinaia di metri. In [16] è simulata una situazione di traffico con almeno un veicolo ogni 10 metri ed un raggio di sensibilità di 250-300 metri (oltre questa distanza si avrebbe un'eccessiva diminuzione dell'affidabilità, a causa dell'elevato tasso di collisione). LTE-V2V dimostra prestazioni ridotte rispetto ad 802.11p in comunicazioni a corto raggio, diventa invece più affidabile a distanze più elevate e sembra essere più adatto per un'area di copertura maggiore.

Questi risultati non sono però confermati in diverse situazioni di traffico. In [17] si analizza la variazione delle prestazioni al variare del livello di congestione stradale. In figura 7 è illustrata la distanza raggiunta (considerando un tasso di errore di pacchetto  $PER = 10^{-2}$ ) in funzione del livello di congestione. Si può osservare che all'aumentare del traffico la perdita in termini di distanza è più elevata per C-V2X rispetto ad ITS-G5 (corrispettivo europeo di DSRC). Resta confermata invece la maggiore distanza raggiungibile per basse densità di utenti, il che è principalmente dovuto alle diverse capacità di canale (4.76 Mbps per 802.11p e 2.4 Mbps per C-V2X).



**Fig. 7 – Range di C-V2X e ITS-G5 in funzione della densità di traffico [17]**

La ricerca dimostra che sia DSRC che C-V2X sono in grado di soddisfare i requisiti per supportare applicazioni di sicurezza di base, in condizioni di traffico moderato, che avvertono il guidatore di possibili situazioni pericolose. La maggior parte di queste applicazioni richiede una periodicità inferiore ai 10 Hz ed una latenza massima di 100 ms. Queste applicazioni sono progettate per aiutare una guida sicura ed efficiente. Tuttavia applicazioni più avanzate, che richiedono un maggiore grado di autonomia del veicolo, presentano requisiti più stringenti. Ad esempio, la guida completamente autonoma richiede un'affidabilità del collegamento del 99.999% ed una latenza massima di 3 ms [18].

### 1.7 Evoluzioni future: IEEE 802.11bd e NR V2X

In conseguenza di quanto illustrato nel paragrafo precedente, nuovi protocolli sono in via di sviluppo per raggiungere prestazioni che possano soddisfare le applicazioni più avanzate.

Da quando è stato pubblicato lo standard 802.11p sono stati introdotti molti miglioramenti di MAC e PHY negli standard 802.11n/ac/ax, che possono essere integrati in 802.11p. Nel 2018 è stato formato il IEEE 802.11 Next Generation V2X Study Group, per lo sviluppo di un nuovo protocollo, 802.11bd, con i seguenti obiettivi:

- raggiungere il doppio del throughput al MAC di 802.11p per velocità fino a 500 km/h;
- raggiungere il doppio della distanza di funzionamento di 802.11p;
- definire un metodo di posizionamento attraverso le comunicazioni V2X.

Inoltre 802.11bd deve supportare:

- retrocompatibilità: i dispositivi 802.11p devono essere in grado di decodificare almeno un metodo di trasmissione dei dispositivi 802.11bd, e viceversa;
- coesistenza: 802.11bd deve essere in grado di rilevare trasmissioni di 802.11p e ritardare l'accesso al canale, e viceversa;
- correttezza: in caso di condivisione del mezzo, 802.11bd e 802.11p devono avere uguali opportunità di accesso al canale.

Alcuni meccanismi importanti per il miglioramento del PHY sono l'adozione dei codici di correzione LDPC (Low Density Parity Check), l'utilizzo di sequenze (simili ai preamboli) per una maggiore accuratezza delle stime di canale, l'utilizzo di diversi schemi di modulazione e codifica (come 256-QAM con code rate di 3/4), la ritrasmissione dei pacchetti per migliorare l'affidabilità e mitigare il multipath fading.

Per quanto riguarda invece 3GPP, è in corso la definizione di NR V2X, ossia la versione di C-V2X basata su 5G NR (New Radio). Tuttavia, NR V2X non ha l'obiettivo della retrocompatibilità con C-V2X. È invece previsto un funzionamento duale nel quale la nuova tecnologia possa supportare le applicazioni che quella precedente non è in grado di realizzare. Alcuni degli obiettivi di NR V2X sono il miglioramento del sidelink e dell'interfaccia Uu, la definizione di un meccanismo per identificare la migliore interfaccia per la trasmissione di uno specifico messaggio V2X e la coesistenza all'interno di uno stesso dispositivo di C-V2X e NR V2X.

Per NR V2X sono previste due modalità di funzionamento del sidelink, analoghe a quelle di C-V2X: la modalità 1 prevede l'allocazione delle risorse da parte di una stazione base (come la modalità 3 di C-V2X), la modalità 2 prevede l'allocazione autonoma delle risorse da parte del veicolo, in modo da consentire il funzionamento in aree fuori dalla copertura delle stazioni base (analogamente alla modalità 4).

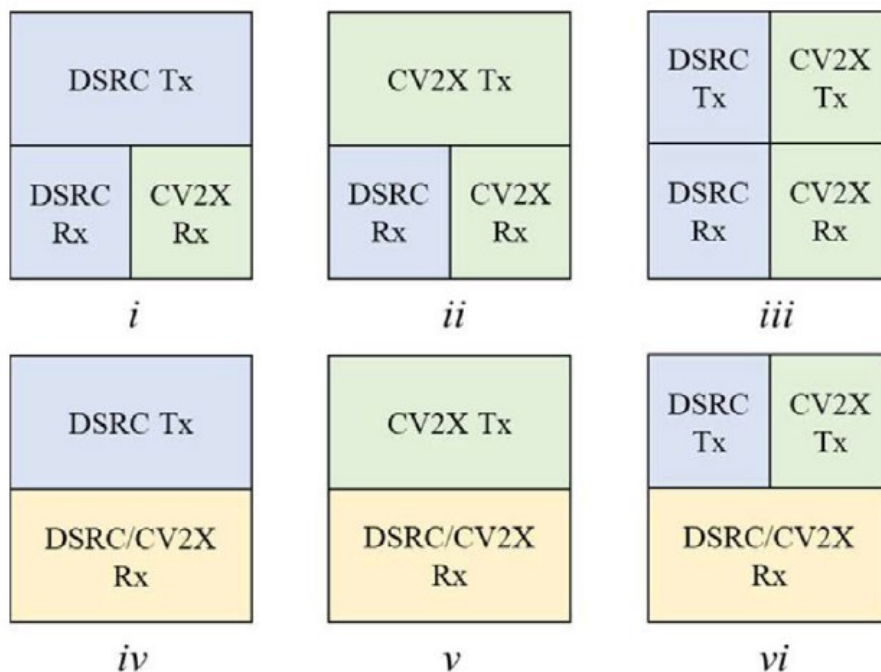
Fra i miglioramenti considerati per NR V2X vi sono:

- la definizione di sotto-modalità della modalità 2, che consentano ai veicoli di aiutarsi fra loro nell'allocazione delle risorse o che consentano ad un veicolo di allocare le risorse per un altro (utile ad esempio in applicazioni di platooning);
- l'inclusione della trasmissione in unicast e groupcast (anche questa utile in applicazioni di platooning);
- la possibilità di suddividere gli slot di tempo (sotto-segmenti di 1 ms) in ulteriori mini-slot, o la loro aggregazione in multi-slot, per un utilizzo più efficiente delle risorse;
- la multiplazione di PSCCH e PSSCH nel tempo anziché nella frequenza, poiché attualmente per iniziare a decodificare il messaggio, il ricevitore deve attendere per l'intera durata del sotto-segmento;

- lo schema Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) e l'introduzione di un canale di feedback per ritrasmissioni più efficienti. Infatti, sebbene C-V2X supporti le ritrasmissioni, esse sono "cieche", ovvero la fonte ha la possibilità di preconfigurarle, ma non essendoci messaggi di ACK avvengono senza sapere se il messaggio sia stato effettivamente recepito o meno.

### 1.8 Soluzioni ibride

La circolazione di veicoli dotati di due tecnologie non compatibili (non in grado di comunicare fra loro) nella stessa regione geografica impedirebbe di sfruttare appieno il loro vero potenziale. Molta ricerca è incentrata quindi su possibili soluzioni che consentano l'interoperabilità, almeno nelle applicazioni di sicurezza, delle due tecnologie. In [13] sono proposte alcune architetture ibride di sistemi V2X, illustrate in figura 8, che possano consentire il funzionamento di entrambe le tecnologie, fintanto che non sia raggiunta una standardizzazione comune. Se in trasmissione è sufficiente l'utilizzo di una sola delle tecnologie (che permette ai costruttori di affrontare un solo processo di certificazione e risparmiare), è invece necessario che i dispositivi siano in grado di ricevere e decodificare i messaggi di entrambe. Ciò può essere fatto con due ricevitori separati, uno dedicato a ciascuna delle tecnologie o con un singolo ricevitore "traduttore" in grado di interpretare sia i messaggi DSRC che i messaggi C-V2X. Tuttavia, l'utilizzo di due trasmettitori consentirebbe di sfruttare i vantaggi di entrambe le tecnologie ed un'ottimizzazione della trasmissione in base ai diversi scenari.



**Fig. 8 - Unità di comunicazione V2X ibrida che permettono operazioni concorrenti e simultanee di DSRC e V2X [13].**

Si pone però il problema della coesistenza. Vi sono due possibili approcci: moltiplicazione a divisione di frequenza (Frequency Division Multiplexing, FDM), dove canali dedicati e non sovrapposti sono allocati a trasmissioni simultanee di DSRC e C-V2X; e moltiplicazione a divisione di tempo (TDM), dove un canale condiviso, suddiviso in slot di tempo, viene assegnato congiuntamente a trasmissioni concorrenti di DSRC e C-V2X, che si alternano. I ricevitori duali consentono maggiore flessibilità e possono utilizzare sia FDM, sintonizzandosi su canali separati, sia TDM, sintonizzandosi sullo stesso canale. I ricevitori singoli “a traduzione” possono utilizzare TDM ascoltando costantemente lo stesso canale, mentre per FDM necessitano di uno schema di frequency hopping.

Tuttavia, queste soluzioni presentano diversi problemi: nel caso di FDM, il problema principale è l'interferenza fra canali adiacenti, mentre l'utilizzo di TDM, sebbene consenta un utilizzo più efficiente dello spettro, rende più difficile garantire basse latenze per applicazioni di sicurezza.

## **2 – VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS: VLC**

Le comunicazioni radio sono state per molto tempo la tecnologia dominante per le comunicazioni veicolari, che tuttavia presentano alcuni problemi. Tra questi vi sono la congestione dei canali in situazioni di alta densità di traffico e soprattutto l'elevato costo richiesto dall'aggiornamento delle infrastrutture in modo da rendere possibile l'interazione coi nuovi sistemi di comunicazione.

Una tecnologia alternativa o complementare alle comunicazioni radio è rappresentata dalle comunicazioni via luce visibile (Visible light communications, o VLC). Negli ultimi anni i miglioramenti dei LED in tempi di commutazione, luminosità e la loro diffusione su larga scala hanno catturato l'attenzione di gruppi di ricerca che hanno cominciato a studiare la luce visibile come nuovo mezzo di comunicazione, complementare alle frequenze radio il cui spettro sta diventando sempre più saturo. Rispetto alle luci a incandescenza, i LED sono meno energivori, più duraturi, meno costosi e generano meno calore, motivi per cui sono ampiamente impiegati nei fanali delle automobili, nella segnaletica e nella illuminazione stradale. Ciò significa che il costo di implementazione dei sistemi VLC, che utilizzano i LED per la trasmissione di segnali, è molto ridotto. Poiché per la comunicazione VLC è necessario un collegamento visivo, in uno scenario di traffico ad alta densità si avrebbe un incremento di collegamenti dedicati fra i veicoli, e si formerebbero quindi molteplici percorsi per la trasmissione dei dati, migliorando il tasso di ricezione. Al contrario per le tecnologie radio aumenterebbe la probabilità di collisione fra pacchetti, impedendo la comunicazione. Inoltre VLC è più robusto rispetto a problemi di multipath [19].

### **2.1 Standardizzazione**

Un tentativo di standardizzare la comunicazione nello spettro visibile è stato fatto in IEEE 802.15.7. Sebbene questo standard non sia stato completamente accettato in ambito industriale e di ricerca, esso include comunque molti principi che riscuotono il consenso generale. Il trasferimento dei dati avviene attraverso la modulazione dell'intensità dei dispositivi ottici (nel caso più semplice la luce viene spenta e accesa), a frequenze impercettibili per l'occhio umano (almeno 200 Hz) e senza inficiare la funzione primaria del dispositivo, cioè l'illuminazione o la segnalazione.

Lo standard IEEE 802.15.7 definisce 3 diversi layer fisici con 3 diversi scopi. In particolare quello di interesse per l'ambiente automotive è il PHY 1, progettato per la comunicazione



all'aperto, con capacità di canale che vanno dai 11.67 Kbps ai 267 kbps. (Gli altri due sono pensati per comunicazioni al chiuso). Sono previsti due tipi di modulazione:

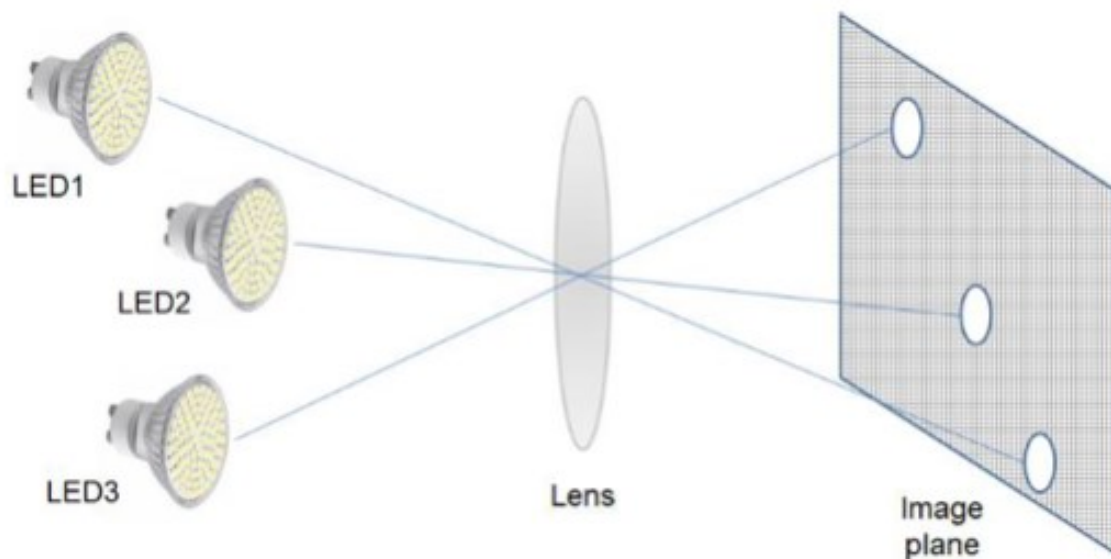
- VPPM, Variable Pulse Position Modulation, consiste nella modulazione della posizione e della larghezza dell'impulso e viene utilizzata per conseguire capacità di trasmissione più alte, a scapito della distanza massima raggiungibile fra trasmettitore e ricevitore;
- OOK, On-Off Keying, che consiste semplicemente nell'accendere e spegnere la luce, è un tipo di modulazione più adatto a comunicazioni che richiedono maggiore distanza e non richiedono capacità di trasmissione elevate.

Per evitare fenomeni di intermittenza viene utilizzata una codifica di canale di tipo Run Length Limited (RLL), che consente di generare un uguale numero di 1 e di 0, evitando lunghe sequenze di 0. In particolare per OOK lo standard specifica l'uso della codifica Manchester, mentre per VPPM utilizza la codifica 4B6B. Inoltre, VPPM consente di controllare l'attenuazione della luce (come effetto dell'intermittenza e della variazione di larghezza degli impulsi).

Lo standard definisce anche una struttura del frame, che viene però considerata troppo grande e poco efficiente [20].

## **2.2 Implementazioni, problemi applicativi e possibili soluzioni**

Il problema principale di VLC è l'instabilità del canale: la rapida variazione delle distanze fra trasmettitore e ricevitore, spostamenti laterali, strade accidentate, condizioni metereologiche e soprattutto la forte interferenza del sole incidono negativamente. In particolare, in un sistema VLC le prestazioni massime sono determinate dal ricevitore, in base al quale i sistemi VLC si dividono in due tipi: basati su telecamere (optical camera communication, OCC) e basati su fotodiodi. La presenza di telecamere sulle automobili è sempre più comune: alcune case automobilistiche (e.g. BMW) hanno presentato concetti di automobili senza specchietti retrovisori, sostituiti da telecamere. Il più grande vantaggio di questo sistema è la eliminazione dei punti ciechi, estendendo di molto il campo visivo del guidatore. Automobili senza specchietti retrovisori e laterali sono state autorizzate in Europa e in Giappone dal 2016 [21]. Le telecamere offrono il vantaggio di sfruttare un campo di vista molto largo e consentono la ricezione da diverse fonti di luce, i cui dati possono poi essere rilevati separatamente sul piano immagine, come illustrato in figura 9.



**Fig. 9 - Elevata risoluzione spaziale di OCC [22]**

Il fattore limitante però sono proprio le videocamere, ancora molto costose se sono richieste alte prestazioni, in particolare il frame rate che possono raggiungere: pertanto le capacità di trasmissione raggiungibili con OCC non sono ancora molto elevate. Per di più è richiesta anche un'elevata capacità di elaborazione per processare le immagini. Ciononostante, Mitsubishi ha realizzato di recente una tecnologia basata su videocamera che permette di riconoscere vari oggetti a distanze fino a 100 metri con un'accuratezza dell'81% [21].

I sistemi a fotodiodi sono più economici e sono anch'essi in grado di funzionare a lunghe distanze, sebbene, a differenza dei sistemi basati su telecamere che sono in grado di isolare spazialmente le fonti di rumore, processino un segnale che è il risultato di una corrente che è generata dalla somma totale della luce incidente. In particolare, in alcune situazioni in cui il sole si trova di fronte al fotodiodo si possono verificare fenomeni di saturazione. Durante il giorno il ricevitore è sottoposto alla luce del sole che varia in potenza ed angolo di incidenza. La ricerca indica che il problema principale non è la potenza della luce emessa, ma la posizione relativa del sole rispetto al ricevitore. In particolare, le situazioni critiche in questo senso sono l'alba e il tramonto, quando il sole si trova direttamente nel campo di vista del ricevitore. Il modo più semplice per affrontare questo problema è ridurre proprio il campo di vista, sebbene ciò limiti il campo di funzionamento della comunicazione [23]. Una possibilità è quella di utilizzare un ricevitore in grado di adattarsi alle condizioni ambientali. In [24] vengono proposti alcuni accorgimenti, fra i quali:

- ottiche adattive per la focalizzazione della luce: utilizzando lenti ottiche per focalizzare il segnale sulla superficie sensibile del fotodiode è possibile aumentare l'SNR. Una maggiore lunghezza focale della lente consente di raggiungere una maggiore distanza, ma comporta una riduzione del campo di vista. Nel testo è proposto l'utilizzo di un meccanismo adattivo della lente, come quelli utilizzati nelle fotocamere;
- campo di vista adattivo: come già detto, in condizioni di sole intenso può essere utile la riduzione del campo di vista che comporta, tuttavia, una minore area di servizio;
- controllo automatico del guadagno: con la variazione della distanza fra trasmettitore e ricevitore cambia anche l'intensità del segnale ricevuto. Un valore statico dell'amplificazione del segnale può portare a saturazione o ad un'amplificazione insufficiente. L'utilizzo di uno stadio per il controllo automatico del guadagno può aumentare significativamente le prestazioni.

Questi sistemi funzionano a distanze inferiori a quelle raggiungibili dai sistemi RF descritti nel primo capitolo. Tipicamente, tali distanze hanno un limite di circa 50 metri, per i quali sono ottenute latenze anche sotto ai 10 ms, consentendo tempi di risposta da parte di eventuali sistemi automatici inferiori anche di 10 volte rispetto alla latenza massima prevista dalle tecnologie radio [25]. Tuttavia, nella sperimentazione sono state riportate anche distanze di 130 metri [26], sebbene solo in assenza di luce solare intensa. Ricordando però la necessità di un collegamento visivo, un'interessante soluzione potrebbe utilizzare VLC per comunicazioni a corta distanza ed in scenari ad alta densità, e comunicazioni radio come quelle presentate per distanze maggiori, che possono raggiungere anche i 500 metri [16].

La luce inoltre ha possibilità di essere utilizzata in sistemi di localizzazione e posizionamento quali LiDAR, VLP e simili.

Magneti Marelli ha sviluppato una soluzione che si è aggiudicata il premio "Innovation Award Honoree" del CES 2019 nella categoria "vehicle intelligence and self-driving technology": Smart Corner, un fanale per automobili che integra un sistema di comunicazione basato su fotodiode, insieme a videocamere a infrarossi, radar e lidar. Il sistema è stato in grado di trasmettere a 100 Mbps fino a 2 metri e a 14 Mbps fino a 15 metri. Tuttavia è stato testato solo in scenari al chiuso [27].

### 3 – INFOTAINMENT

I sistemi di infotainment, fusione delle parole information ed entertainment, sono oggi una componente fondamentale dell'automobile. L'obiettivo delle case automobilistiche è quello di offrire al guidatore e ai passeggeri maggiore comfort alla guida e nell'esperienza di viaggio. L'infotainment di un'auto utilizza come principale interfaccia lo schermo posto in posizione centrale sulla plancia e/o quello che integra o sostituisce la strumentazione tradizionale. Attorno ad esso gravitano di norma l'impianto stereo, l'eventuale navigatore satellitare e tutto ciò che riguarda la connettività con gli smartphone. In particolare, i sistemi più moderni sfruttano spesso i software Apple CarPlay e AndroidAuto per far sì che i telefoni iOS e Android possano interagire al meglio con l'elettronica di bordo e permettano di gestire in modo ottimizzato dal display dell'auto alcune app e i contenuti principali. Con il medesimo display dell'infotainment si può talvolta controllare anche l'impianto di climatizzazione e consultare i dati rilevati dal computer di bordo, oltre che monitorare gli eventuali flussi di energia sulle auto ibride ed elettriche. Il tutto può essere gestito con tasti fisici posti sul volante multifunzione, attorno al display oppure sul tunnel centrale o ancora agendo sul touch screen. Molti sistemi rispondono in alternativa a comandi vocali oppure gestuali, compiuti nello spazio davanti alla console e rilevati da appositi sensori. I sistemi d'infotainment assicurano una migliore fruizione delle informazioni in viaggio, consentono una connettività estesa e danno opportunità ai passeggeri di godere di viaggi più piacevoli, senza però che ci siano particolari distrazioni per il pilota. Bluetooth si è affermato come standard per le comunicazioni radio a corto raggio fra smartphone e sistemi di infotainment nelle automobili, essendo ormai presente pressoché in ogni telefono. Una delle sue principali applicazioni è la trasmissione di segnali audio. Questi possono essere trasmessi con due diversi profili Bluetooth: handsfree profile (HFP) è utilizzato per le chiamate, mentre advanced audio distribution profile (A2DP) è utilizzato per riproduzione di musica stereo.

## 4 - BLUETOOTH LOW ENERGY: BLE

Una tecnologia che sta diventando molto popolare è Bluetooth low energy (BLE), per le sue caratteristiche tecniche e per la sua diffusione negli smartphone e tablet. Con questa tecnologia i consumatori hanno la possibilità, coi propri dispositivi di interagire con qualunque altro dispositivo dotato di BLE. Questo lo rende molto interessante per applicazioni di infotainment in cui il consumatore possa interagire col proprio veicolo tramite il proprio telefono. Ciò aumenta il comfort del guidatore e dei passeggeri e permette di offrire, grazie alla connettività, un'esperienza personalizzata nell'ambiente del veicolo in modo semplice e sicuro. Per citare alcuni esempi di applicazioni di BLE che si basano sull'utilizzo dello smartphone:

- accesso "smart" al veicolo: lo smartphone funge da chiave virtuale, permette di svolgere alcune funzioni quali blocco/sblocco delle portiere, accensione del motore. La comunicazione bidirezionale tra la macchina e il telefono può avvenire con BLE;
- car sharing: l'accesso smart al veicolo facilita un modo semplice e sicuro di noleggiare auto. Un'app per smartphone riceve i codici necessari per accedere al veicolo assegnato. Quando il guidatore si avvicina all'auto, i codici sul telefono vengono autenticati comunicando via BLE, abilitando l'accesso al veicolo. Si possono anche preconfigurare il momento e la durata dell'accesso;
- diagnostica del veicolo: informazioni sul veicolo quali pressione degli pneumatici, quantità di carburante, stato della batteria e temperatura possono essere inviati direttamente dall'automobile – o attraverso una chiave standard (per maggior sicurezza e range) – allo smartphone usando BLE. Gli smartphone possono anche mostrare informazioni per aiutare i guidatori a capire il significato di spie d'allarme;
- assistenza al guidatore e personalizzazione: il veicolo può riconoscere lo smartphone del guidatore quando questo si avvicina e attivare luci interne e/o esterne, personalizzare la posizione dei sedili e regolarne l'inclinazione, regolare la climatizzazione e preferenze di infotainment;
- parcheggio pilotato/assistito/remoto: l'idea è quella che l'utente possa uscire dal veicolo, attivare un'app dal telefono e la macchina si parcheggi da sola. Il parcheggio pilotato consente di parcheggiare l'auto in spazi dove il parcheggio manuale è complicato e dove entrare ed uscire dalla macchina è difficile se non impossibile. Ciò richiede dal punto di vista delle manovre una gran quantità di sensori intorno al veicolo, così come un'intelligenza integrata dentro al veicolo. La comunicazione tra il veicolo ed un'app per smartphone tramite BLE può attivare e controllare il processo di parcheggio. (Tipicamente,

è richiesto un certo tipo di interazione con il telefono per mantenere il processo in corso; se il guidatore toglie il dito dallo schermo o termina l'interazione, il veicolo si ferma immediatamente).

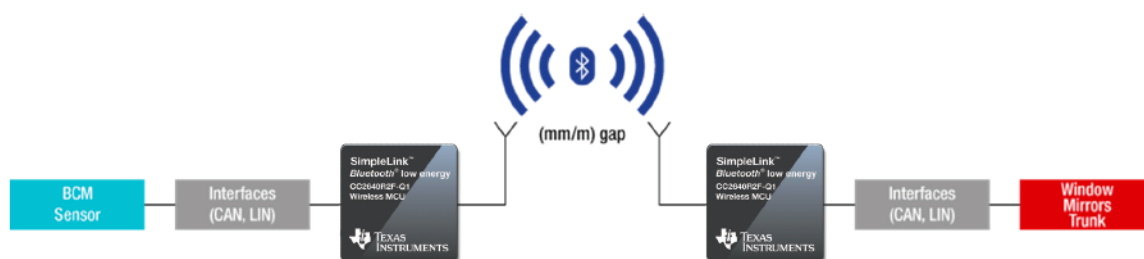
La possibilità di determinare la posizione con buona accuratezza (che dipende dalla particolare applicazione) è una questione centrale nelle applicazioni all'interno e all'esterno delle auto connesse. Le tecniche più utilizzate a questo scopo includono la stima della potenza del segnale ricevuto (Received Signal Strength Indicator, RSSI) o del tempo di propagazione (Time-of-Flight, ToF), in modo da determinare la distanza tra il trasmettitore ed il ricevitore, e la stima dell'angolo di partenza (Angle of Departure, AoD) o angolo di arrivo (Angle of Arrival, AoA), che possono essere utilizzati per la triangolazione. La determinazione della posizione con elevati livelli di accuratezza e risoluzione in un ambiente wireless presenta comunque molte difficoltà.

Le funzionalità di accesso al veicolo tramite BLE, quali Passive Entry Passive Start (PEPS, ovvero la possibilità di entrare nell'automobile ed accendere il motore, senza l'utilizzo fisico della chiave) ed altre applicazioni legate allo smartphone, possono essere implementate nel veicolo come parte del Body Control Module (BCM), Electronic Control Unit (ECU), o simili. In figura 10 è rappresentato un diagramma a blocchi per l'accesso al veicolo con BLE usando dei chip Texas Instruments.



**Fig. 10 – Diagramma a blocchi del sistema di accesso al veicolo con Bluetooth Low Energy [28]**

Un'altra potenziale applicazione di BLE è la riduzione del cablaggio. Al momento, la maggior parte dei sensori del veicolo sono connessi alla ECU con cavi fisici. Con l'aumentare della complessità del veicolo, il numero di cavi necessari a connettere i sensori porta ad un aumento in peso e costo. Inoltre il collegamento via cavo limita le possibilità di posizionamento dei sensori e quindi anche le possibili applicazioni. Utilizzare sensori wireless può aiutare a ridurre il peso del veicolo e diminuire quindi il consumo di carburante. Eliminare connessioni fisiche sostituendo i cavi fra specchietti, finestrini e bagagliaio con BLE può anche aumentare l'affidabilità e flessibilità nelle fasi di costruzione. In figura 11 è illustrato come il collegamento wireless può sostituire i cavi fra finestrini o specchietti e BCM.



**Fig. 11 – Concetto di sostituzione dei cavi con Bluetooth Low Energy [28]**

Dati i requisiti di basso consumo e basso costo di questo tipo di applicazione, per la sostituzione di cavi è opportuno utilizzare circuiti integrati con BLE a modalità singola.

Per applicazioni wireless, lo spettro di frequenze utilizzabile può variare in base alla regolamentazione locale. BLE opera a 2.4 GHz, nella banda ISM, che è disponibile globalmente. Questo è particolarmente importante nella sostituzione dei cavi, in quanto, se le case automobilistiche utilizzassero le bande sotto al GHz, dovrebbero utilizzare reti a frequenze diverse a seconda dei requisiti locali.

#### **4.1 Tipi di Bluetooth e di dispositivi**

Vi sono due versioni di Bluetooth: basic rate (BR) ed enhanced data rate (EDR), comunemente indicati come Bluetooth “classico” e Bluetooth Low Energy. I due sono complementari ed ottimizzati per applicazioni diverse. Mentre il Bluetooth classico è pensato per applicazioni ad alta capacità di trasmissione ed elevato duty cycle, come cuffie wireless o altoparlanti, Bluetooth Low Energy è indicato per applicazioni a basso duty cycle e per la trasmissione di

piccole quantità di dati, tipiche di applicazioni quali cinture per il battito cardiaco o chiavi di automobili.

Esistono tre tipi di dispositivi: a modalità singola con Bluetooth classico, a modalità singola con Bluetooth Low Energy e a modalità duale. I dispositivi a modalità duale possono comunicare sia con dispositivi Bluetooth che Bluetooth Low Energy. Dispositivi a modalità singola Bluetooth Low Energy non possono comunicare con dispositivi Bluetooth, ma solo con altri dispositivi Bluetooth Low Energy (a modalità singola o duale).

Bluetooth Low Energy è stato introdotto nel 2010 con Bluetooth 4.0. È uno standard progettato con lo scopo di ridurre al minimo il consumo di potenza ed è ottimizzato per applicazioni wireless a bassa complessità, basso costo e che richiedono poca banda. Dalla sua introduzione è stato aggiornato diverse volte; in particolare, sono state apportate migliorie nel campo della sicurezza e sono state aggiunte diverse capacità di canale.

## **4.2 Consumo di potenza**

Generalmente le applicazioni che fanno uso di BLE, comprese quelle nel settore automotive, scambiano piccole quantità di dati e consumano una piccola quantità di energia. La quantità di elettronica utilizzata dalle automobili è in costante crescita, e questo aumento impone limiti più stringenti nel consumo di potenza. Un alto consumo di potenza elettrica significa ridotta efficienza nel consumo di carburante, ed un consumo eccessivo a macchina spenta può scaricare la batteria e impedire l'accensione dopo lunghi periodi di fermo. Pertanto il consumo di ogni sistema in qualunque condizione operativa dev'essere minimizzato. BLE è stato sviluppato dal physical layer ai layer superiori al fine di mantenere al minimo il consumo di potenza. A livello fisico, BLE usa canali con spaziatura di 2 MHz e criteri di selettività relativamente rilassati, ed utilizza la modulazione GFSK (gaussian frequency shift keying), che permette di utilizzare design con efficienti amplificatori di potenza non lineari. BLE definisce 37 canali ed effettua la ricerca su 3 canali. Tempi di ricerca e di connessione possono essere limitati ad alcuni millisecondi, dato il semplice schema di canalizzazione. Il basso consumo a livello del network layer è ottenuto grazie ad un efficiente duty cycle (il dispositivo può restare connesso in modalità sleep e svegliarsi brevemente per trasmettere piccole quantità di dati), assieme ad una rigorosa gestione della potenza ed un basso overhead di trasmissione. Questi semplici requisiti permettono alle imprese di semiconduttori di ottimizzare le correnti in modalità operativa ed in modalità sleep, accorciando i tempi di commutazione. In questo modo, i dispositivi BLE (a modalità singola) possono essere semplici, a basso consumo e di basso costo. Generalmente i circuiti integrati con BLE incorporano tutte le funzionalità in un dispositivo simile ad un sensore, escluso l'elemento sensibile vero e proprio. Per esempio, Texas Instruments realizza



un dispositivo dedicato all'automotive con BLE (a modalità singola), CC2640R2F-Q1. Questo dispositivo contiene un ricetrasmittitore RF, un microcontrollore (MCU) e periferiche, oltre ad una memoria non volatile (Flash). Tale dispositivo richiede circa 6 mA (picco) in trasmissione o ricezione radio. Consuma  $\sim 1 \mu\text{A}$  in standby con segnale di temporizzazione a bassa potenza. La memoria flash permette aggiornamenti del firmware over-the-air (OTA) una volta che il dispositivo è in utilizzo [28].

### 4.3 Sicurezza

La protezione delle informazioni private di un utente è un problema che concerne ogni sistema wireless; anche in ambiente automotive la sicurezza è di fondamentale importanza. Comunicazioni sicure proteggono l'accesso ai dati che vengono scambiati ed impediscono che dispositivi non autorizzati inseriscano dati che potrebbero avviare operazioni impreviste in un sistema automotive.

Di seguito si riportano alcuni dei meccanismi per la sicurezza di Bluetooth Low Energy:

- accoppiamento e generazione/scambio chiavi: l'accoppiamento è il processo in cui i dispositivi coinvolti in una comunicazione scambiano tra loro informazioni di identità, per stabilire un legame fiduciario, e le chiavi di codifica per lo scambio di dati. In Bluetooth 4.2 è stato introdotto l'algoritmo ECDH (elliptical curve Diffie-Hellman) per lo scambio di chiavi;
- cifratura: BLE usa la cifratura AES in modalità counter col Cipher Block Chaining Message Authentication Code (CBC-MAC) Protocol. Questa funzione trasforma 128 bit di dati in chiaro in 128 bit di dati cifrati utilizzando una chiave di 128 bit ed un cifrario a blocchi di 128 bit, come definito in FIPS 197;
- dati autenticati: BLE offre la possibilità a due dispositivi accoppiati di trasmettere dati autenticati attraverso un canale in chiaro. Il trasmettitore firma i dati con un codice di autenticazione del messaggio generato da un algoritmo. Il ricevitore verifica la firma e stabilisce che il messaggio proviene da una fonte affidabile;
- privacy: BLE possiede una funzione che rende più difficile rintracciare un dispositivo BLE per un certo periodo di tempo, cambiando frequentemente l'indirizzo del dispositivo. Soltanto dispositivi di fiducia possono determinare questo indirizzo privato.

Inoltre, Bluetooth Low Energy dispone di cinque servizi di sicurezza di base:

- accoppiamento e associazione per creare una o più chiavi segrete condivise e memorizzarle per l'utilizzo in comunicazioni sicure consecutive;
- autenticazione per verificare l'identità dei dispositivi BLE comunicanti in base al loro indirizzo;

- riservatezza per impedire che le informazioni vengano intercettate, ed assicurare che solo dispositivi autorizzati possano accedere ai dati scambiati ed interpretarli;
- autorizzazione per il controllo delle risorse ed assicurare che un dispositivo sia autorizzato ad utilizzare dei servizi prima che gliene venga concesso l'uso;
- integrità del messaggio per verificare che i dati scambiati fra due dispositivi BLE non siano stati alterati o compromessi in transito.

I principali pericoli di cybersecurity in una comunicazione wireless sono rappresentati da attacchi di “eavesdropping” (letteralmente “origliare”) e man-in-the-middle (MITM). L'eavesdropping consiste nell'intercettare segretamente comunicazioni private senza averne il permesso. Un metodo per proteggersi da questo attacco è l'utilizzo di una chiave per codificare i dati. Come detto, BLE utilizza per proteggersi da questo tipo di minaccia l'algoritmo ECDH, che permette lo scambio di chiavi su di un canale non sicuro e rende estremamente difficile per un dispositivo intruso indovinare la chiave di codifica.

In un attacco MITM mentre due dispositivi BLE (come una macchina ed uno smartphone) cercano di comunicare tra loro, un terzo dispositivo si inserisce fra di essi, assumendo rispetto a ciascuno l'identità dell'altro. L'autenticazione tramite accoppiamento o la firma dei dati protegge da questo tipo di attacchi ed assicura che il veicolo stia comunicando con il dispositivo corretto.

CC2640R2F-Q1 di Texas Instruments, sopra citato, sfrutta ed implementa le funzioni menzionate con un modulo hardware per la cifratura Advanced Encryption Standard (AES), una memoria ROM con una libreria crittografica (elliptic curve), un generatore di numeri casuali (true random number generator) ed altri meccanismi di elaborazione di segnali.

#### **4.4 Robustezza e affidabilità**

I fattori determinanti per la robustezza e l'affidabilità di una connessione wireless sono il bilancio di collegamento ottenibile e la coesistenza con altri sistemi wireless. Il massimo range ottenibile con BLE dipende dalle caratteristiche dei dispositivi, quali la massima potenza di trasmissione e la sensibilità del ricevitore. Altri fattori da tenere in considerazione sono le prestazioni dell'antenna e la presenza di ostacoli fisici sul cammino del segnale. Bluetooth è noto comunemente per personal area networks con distanze corte (~10–30 m), in applicazioni che comprendono dispositivi come cuffie o altoparlanti wireless. Tuttavia, sia Bluetooth che Bluetooth Low Energy hanno potenzialmente un range maggiore di quanto si possa pensare, dimostrando di funzionare anche a distanze di 350-500 m [28].

Bluetooth 5.0 ha aggiunto 3 nuove capacità di canale al PHY di Bluetooth Low Energy, una delle quali permette di raggiungere una velocità di trasmissione di 2 Mbps. Questo rate di dati

facilita veloci ed affidabili aggiornamenti di firmware OTA o rapidi upload di dati raccolti. Le altre due capacità (125 kbps e 500 kbps) sono pensate apposta per aumentare il range. L'opzione da 125 kbps raggiunge approssimativamente quattro volte la distanza raggiunta da Bluetooth Low Energy 4.x a 1 Mbps, grazie all'implementazione di intelligenti strategie di elaborazione del segnale che non aumentano il consumo di potenza complessivo della trasmissione.

La possibilità di utilizzare diverse capacità di canale offre flessibilità agli sviluppatori di applicazioni automotive nel determinare il range e la larghezza di banda a seconda delle necessità.

Per quanto riguarda la coesistenza con altre reti, BLE utilizza il meccanismo di Adaptive Frequency Hopping (AFH), comune a tutte le versioni di Bluetooth, per minimizzare l'interferenza con altre tecnologie wireless che utilizzino la banda ISM a 2.4 GHz. In particolare, BLE può aggiornare dinamicamente la sequenza di frequency-hopping per evitare canali dove si ha interferenza durante la comunicazione. Il frequency hopping è anche una maniera efficiente di mitigare problemi di multipath fading.

## 5 - ULTRA WIDEBAND: UWB

Si presenta ora una tecnologia di recente diffusione (disponibile negli ultimi modelli di iPhone e Samsung Galaxy), utilizzata soprattutto per applicazioni di localizzazione (ad esempio per quanto riguarda le chiavi delle automobili). Si tratta di ultra wide-band, o UWB.

La possibilità di localizzare con grande precisione il proprietario di un'automobile attraverso le chiavi o persino lo smartphone permette un'esperienza di accesso al veicolo semplice e fluida. Quando il guidatore si sta avvicinando alla macchina, ad esempio ad una decina di metri da essa, lampeggiano le luci per trovarla più facilmente in un parcheggio. Mentre ci si avvicina ulteriormente l'auto può attivare il riscaldamento o l'aria condizionata. Raggiunta la portiera, molto vicini all'automobile, questa si sblocca, gli specchietti si aprono e il sedile si sistema secondo le preferenze del guidatore. Una volta dentro, il motore si accende.

UWB è in realtà una tecnologia non completamente standardizzata che ha subito molti cambiamenti negli anni, prendendo piede nel mercato solo di recente. Ultra wide-band è un termine generale che indica una comunicazione radio con larghezza di banda di 500 MHz o maggiore, in questo testo si fa riferimento alla tecnologia sviluppata in IEEE 802.15.4z su cui si basano le certificazioni del FiRa Consortium (di cui fanno parte anche NXP, Samsung ed Apple).

Inizialmente, UWB fu sviluppato negli anni '60 per applicazioni radar. Più tardi, fu utilizzato come tecnologia per il trasferimento dati ad alta capacità (fino a 480 Mbps) basata su OFDM e fu standardizzato in IEEE 802.15.3. Questa versione fu presto resa obsoleta dalle prestazioni raggiunte dal Wi-Fi. UWB trovò la sua vocazione per la localizzazione quando fu standardizzato nel 2007 in IEEE 802.15.4a, in cui viene utilizzato come radio a impulsi. IEEE 802.15.4a definisce una radio a impulsi basata su UWB incentrata su basso consumo e localizzazione precisa (incertezza al di sotto del metro). Nel 2020 è stata rilasciata la più recente versione di questo standard, 802.15.4z, che ha portato un grande aumento della precisione (errore di pochi centimetri) e molti aggiornamenti di sicurezza. Infatti, un punto di grave vulnerabilità delle chiavi attualmente in uso sono i cosiddetti attacchi relay: sinteticamente, attraverso un computer che fa da ponte è possibile catturare e replicare i segnali di apertura e accensione del veicolo provenienti dalla chiave (ove ne sia stata individuata la posizione) anche a distanze superiori rispetto a quelle programmate per la normale gestione del veicolo stesso. Ciò è possibile perché i sistemi attuali utilizzano la potenza del segnale per determinare la posizione delle chiavi rispetto al veicolo. UWB è molto resistente a questo tipo di attacchi, in quanto la distanza viene determinata attraverso il tempo in volo (TOF), per cui nel caso di

attacchi di questo genere la chiave risulterà fuori dal range di funzionamento. Inoltre, UWB impiega altri meccanismi di sicurezza che impediscono di manomettere le misurazioni. Mentre il protocollo della IEEE si occupa principalmente del physical layer e in parte del MAC, FiRa (consorzio di aziende del calibro di Intel, Microsoft e Hyundai, per citarne alcune) si occupa di sviluppare soluzioni e certificati che consentano la compatibilità a tutti i layer tra diversi dispositivi.

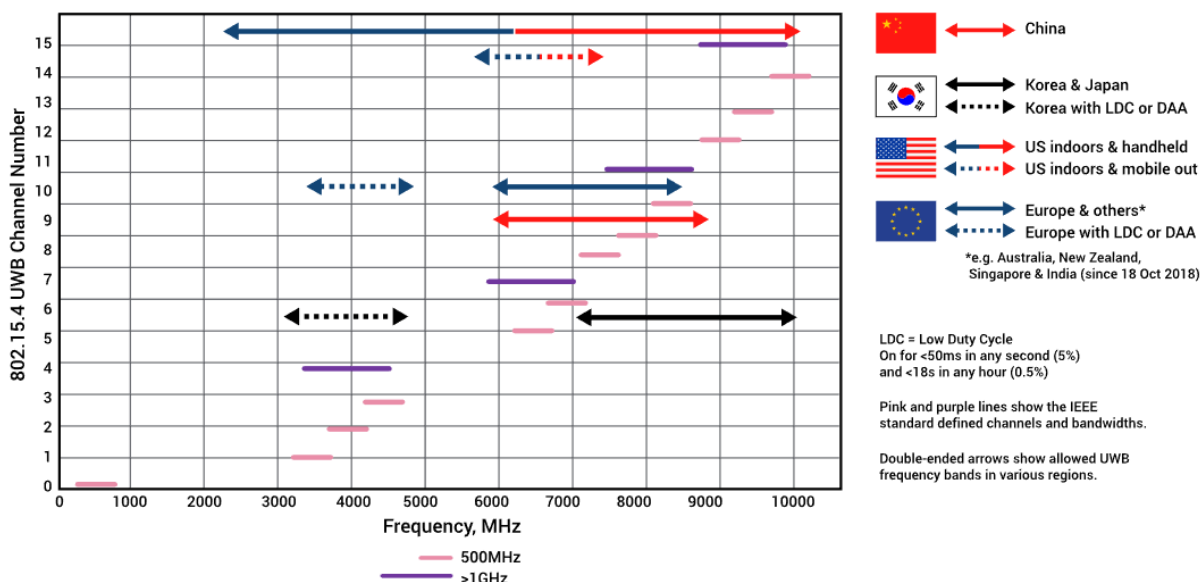
## 5.1 Physical Layer

A differenza delle altre tecnologie wireless che operano modulando onde sinusoidali su una banda di frequenze stretta, UWB utilizza una serie di impulsi su una banda larga. Questi impulsi sono stretti ed hanno un fronte di salita a pendenza elevata, rendendoli facili da identificare anche in ambienti rumorosi, inoltre possono essere facilmente separati e filtrati al ricevitore, rendendo UWB robusto ad effetti di multipath (riflessioni). Inoltre UWB opera tipicamente fra i 6.5 ed 8 GHz, lontano dal traffico della banda ISM. In tabella 1 sono indicati i 16 canali definiti per UWB, tuttavia non tutti possono essere utilizzati a seconda della regione in cui ci si trova. L'unico canale obbligatorio per la certificazione FiRa è il canale 9, che è disponibile globalmente [29].

Channel number	Center frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)
0	499.2	499.2
1	3494.4	499.2
2	3993.6	499.2
3	4992.8	499.2
4	3993.6	1331.2
5	6489.6	499.2
6	6988.8	499.2
7	6489.6	1081.6
8	7448.0	499.2
9	7987.2	499.2
10	8486.4	499.2
11	7987.2	1331.2
12	8985.6	499.2
13	9494.8	499.2
14	9984.0	499.2
15	9484.8	1354.97

**Tab. 1 - Allocazione della banda per HRP UWB [30]**

Nel 2012, con l'emendamento IEEE 802.15.4f, sono stati introdotte due modalità di funzionamento del physical layer: high rate pulse (HRP) e low rate pulse (LRP). Come si evince dal nome HRP trasmette impulsi ad una frequenza maggiore di LRP, tuttavia la massima energia trasmessa è la stessa, poiché è limitata dalla densità spettrale di potenza media massima. Ne risulta che HRP trasmette più impulsi ma meno potenti, mentre LRP trasmette impulsi più potenti ma in minor numero. Considereremo solo HRP UWB essendo quello più utilizzato (e supportato da FiRa) poiché permette di raggiungere minore latenza e maggiore densità di dispositivi UWB, e di raggiungere complessivamente prestazioni migliori. Inoltre, dal punto di vista della sicurezza, rende più difficile intercettare il segnale, a causa della bassa potenza degli impulsi.



**Fig. 12 - Disponibilità di spettro per Paese - [29]**

### 5.1.1. Struttura del frame

In 802.15.4a era definita una sola struttura del frame, il primo in figura 13, costituito da un massimo di 4 campi, mentre in 802.15.4z, con l'introduzione del nuovo campo Scrambled Timestamp Sequence (STS), sono stati definiti 4 diversi frame a seconda della presenza e della posizione del STS. La vecchia struttura è stata mantenuta per permettere la retrocompatibilità o in caso non sia necessario un alto livello di sicurezza nella comunicazione.

SYNC	SFD	PHR	PHY Payload		
SYNC	SFD	PHR	PHY Payload	STS	
SYNC	SFD	STS		PHR	PHY Payload
SYNC	SFD	STS			

**Fig. 13 - Le quattro possibili strutture di frame per HRP UWB nello standard IEEE 802.15.4z [30]**

Il campo SYNC o preambolo serve alla sincronizzazione fra trasmettitore e ricevitore. Il preambolo è costituito da una sequenza costruita con un codice ternario (di alfabeto 1, 0, -1), dove 1 corrisponde ad un impulso positivo, -1 ad un impulso negativo, 0 al segnale nullo. Ogni canale ha almeno due codici compatibili. I codici di un canale sono scelti in modo che abbiano un basso fattore di correlazione incrociata, il che consente a più dispositivi di utilizzare lo stesso canale simultaneamente senza interferenza.

Il campo SFD (start-of-frame delimiter) indica la fine del preambolo ed il punto di partenza del PHY header (PHR); inoltre, è utilizzato per la marcatura temporale ed è quindi importante per la determinazione delle distanze (ranging).

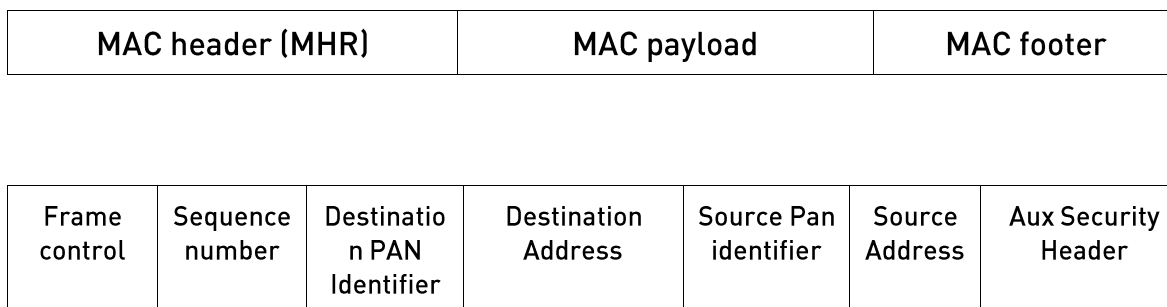
Dopo SFD comincia il vero e proprio pacchetto di dati, che inizia col campo PHR. Questo contiene informazioni sul carico che viene trasmesso. Fra i sottocampi che formano il PHR è di particolare interesse il campo SECDED, Single Error Correct Double Error Detect, consistente in un codice di Hamming che consente, al ricevitore, la correzione di un errore di trasmissione ed il rilevamento di due errori. Il PHR può essere configurato in modo da aumentare i bit per il campo Frame Length, che definisce la lunghezza del payload in byte, eliminando i campi "Reserved" e "Preamble Duration". Il payload può dunque arrivare fino a 4096 byte.

Bits: 0-1	2-8	9	10	11-12	13-18
Data Rate	Frame Length	Ranging	Reserved	Preamble Duration	SECDEC

**Fig. 14 - Formato del campo PHR nello standard IEEE 802.15.4z [30]**

Il numero di possibili codici di preambolo è limitato. Tali codici sono ripetuti più volte nel campo SYNC. Ciò costituisce una potenziale vulnerabilità ad attacchi. Per aumentare la sicurezza viene inserito il nuovo campo Scrambled Timestamp Sequence (STS). Questo è una sequenza di impulsi pseudo-casuali generati da un generatore deterministico di numeri casuali (DRBG). Gli impulsi sono organizzati in blocchi di segmenti attivi spazati da intervalli di silenzio. Per decodificare la STS il ricevitore ha bisogno di avere una copia della sequenza disponibile localmente prima della ricezione. Ciò è possibile solamente se sia il trasmettitore che il ricevitore conoscono le chiavi e lo schema di cifratura per la generazione della STS. Diversamente, la decodifica fallisce e la comunicazione risulta impossibile. Il modo in cui condividere le chiavi non è specificato nello standard. Generalmente questo problema viene affrontato a layer superiori ed utilizzando tecnologie di comunicazione diverse da UWB.

## 5.2 MAC Layer



**Fig. 15 – Frame MAC (sopra) e sottocampi dell’header (sotto) [30]**

Per quanto riguarda il layer MAC, nello standard 802.15.4z è definito il formato dei messaggi scambiati a questo livello. Un messaggio MAC è composto dall’header, suddiviso a sua volta in campi come illustrato in figura 15, seguito da un carico (payload) di lunghezza variabile. La parte finale (footer) è una Frame Checking Sequence (FCS) che contiene un valore Cyclic Redundancy Check (CRC) per il riconoscimento di eventuali errori di ricezione all’interno del frame stesso.

Il campo frame control dell’header è composto da 16 bit suddivisi ulteriormente in sottocampi che contengono informazioni sul tipo e sullo stato della comunicazione, quali il tipo di frame, richiesta di acknowledgement dei frame, se ci sono ancora dati da inviare etc. Negli standard non è invece definito uno schema di gestione delle risorse e delle collisioni. Questo costituisce un problema che andrà affrontato in futuro, in quanto vengono utilizzati schemi proprietari che compromettono la compatibilità (interoperabilità) di diversi sistemi UWB.



### 5.3 Tecniche di localizzazione

Il principale ambito applicativo di UWB è la localizzazione. Questa viene implementata attraverso il calcolo della distanza o della posizione relativa fra due dispositivi, che si ottengono attraverso le informazioni temporali riportate dai messaggi scambiati dai dispositivi. In generale però, per determinare univocamente la posizione di un dispositivo mobile (detto tag), servono almeno 3 dispositivi fissi (detti ancore). In figura 16 una possibile distribuzione delle ancore in un'automobile. Vediamo allora quali sono i meccanismi definiti da 802.15.4z per calcolare la posizione.

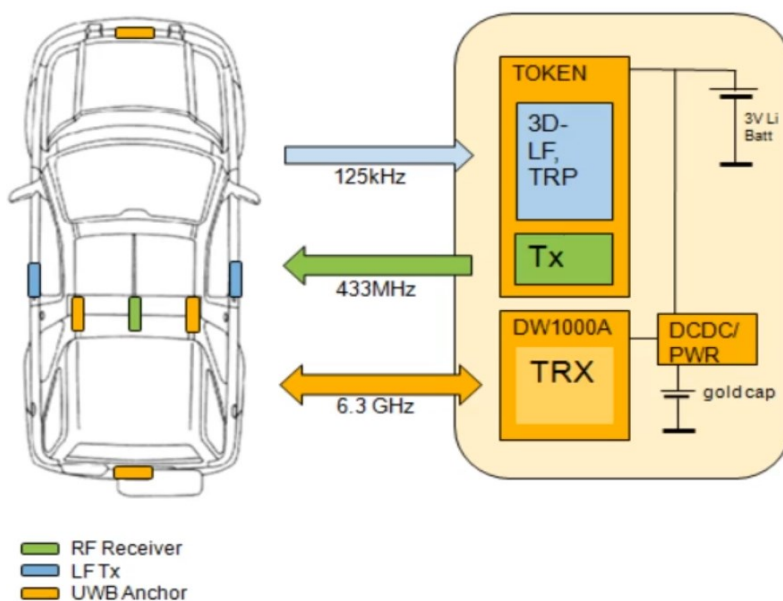
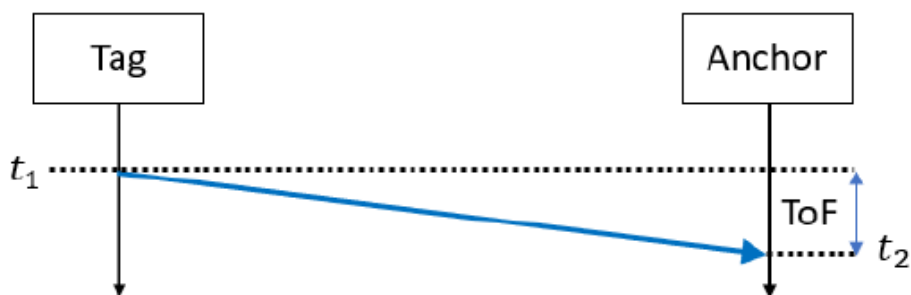


Fig. 16 – Accesso senza chiave abilitato da UWB [31]

#### 5.3.1 Time of Flight (ToF)

Il metodo più semplice prevede di calcolare il tempo di volo (time of flight) del segnale. Il tag trasmette un messaggio UWB che riporta l'istante in cui è stato trasmesso,  $t_1$ . L'ancora riceve il messaggio all'istante  $t_2$  e calcola il ToF come  $t_2 - t_1$ . Poiché i segnali elettromagnetici viaggiano alla velocità della luce  $c$ , moltiplicando il tempo per tale velocità si ottiene la distanza  $d = c \times ToF$ .

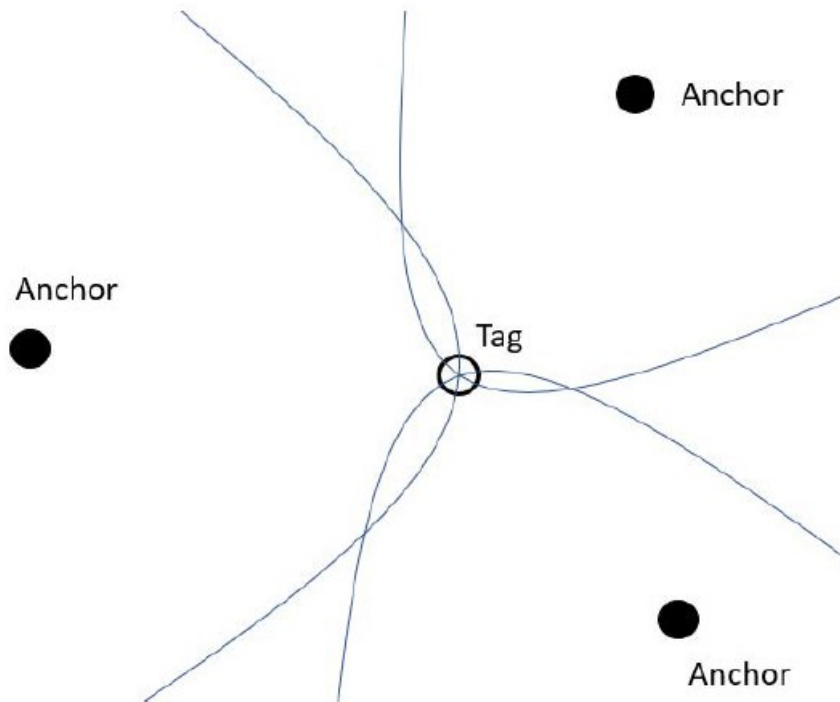


**Fig. 17 - Tecnica di localizzazione ToF [30]**

Questa è una distanza radiale che non indica la direzione in cui si trova il dispositivo. Per trovare la posizione è necessario calcolare la distanza radiale da tre diverse ancore. Una volta calcolata la distanza da tre ancore è possibile ricavare la posizione del tag attraverso la trilaterazione. Lo svantaggio di questo metodo è la necessità di una precisa sincronizzazione fra tutti i nodi. La precisione di tale sincronizzazione impatta direttamente sulla precisione della localizzazione.

### 5.3.2 Time Difference of Arrival (TDoA)

La localizzazione tramite Time Difference of Arrival (TDoA), anche detta One-Way Ranging (OWR), si basa sui tempi di arrivo di alcuni messaggi. Può essere realizzata in due modi: nel primo caso il tag emette un messaggio (detto blink) verso i nodi fissi (le ancore), altrimenti sono i nodi fissi ad inviare messaggi sequenzialmente con offset di tempo di trasmissione noti fra loro. In entrambi i casi è necessario che i nodi fissi siano sincronizzati affinché i tempi siano comparabili. Per ogni coppia di nodi fissi la differenza di tempo di arrivo, del blink nel primo caso o dei messaggi inviati dalle ancore nel secondo, determina una iperbole. L'intersezione di almeno tre iperboli definisce la posizione del tag, come illustrato in figura 18. Si noti, che nel secondo caso, nel calcolo della differenza del tempo di arrivo è tenuto conto anche degli offset di trasmissione. Si noti, inoltre, che a seconda del caso solo il tag o il sistema di nodi fissi conosce la posizione del tag (One-Way Ranging), a meno che non venga trasmesso un ulteriore messaggio. In un sistema automotive, però, non c'è bisogno che la chiave conosca la propria posizione.

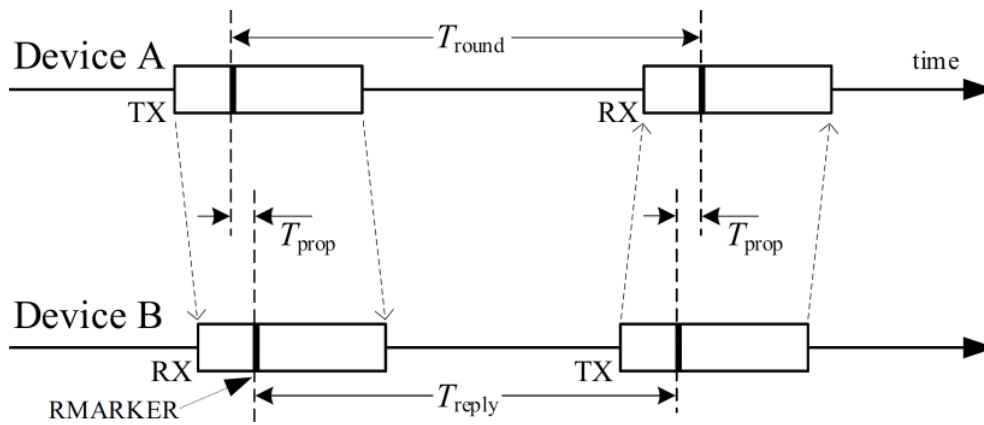


**Fig. 18 -Localizzazione TDoA con l'utilizzo di iperboli [30]**

### 5.3.3 Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR)

Questo metodo è un'evoluzione del ToF, in quanto elimina il bisogno di sincronizzazione fra due dispositivi. Ciò è possibile grazie al fatto che si usano marcature temporali di un solo dispositivo. L'ancora invia un messaggio che viene ricevuto dal tag dopo il tempo di propagazione. Il tag risponde dopo un certo tempo ( $T_{reply}$ ), che può essere predeterminato o stimato a priori con buona accuratezza dall'ancora o dal tag; in quest'ultimo caso, il tag può inserire tale tempo nel messaggio di risposta. Ricevuta la risposta l'ancora può calcolare il round-trip time (RTT), sottrarre il tempo di risposta e dividerlo per due, ottenendo così il tempo di propagazione:

$$T_{prop} = \frac{1}{2}(T_{round} - T_{reply})$$



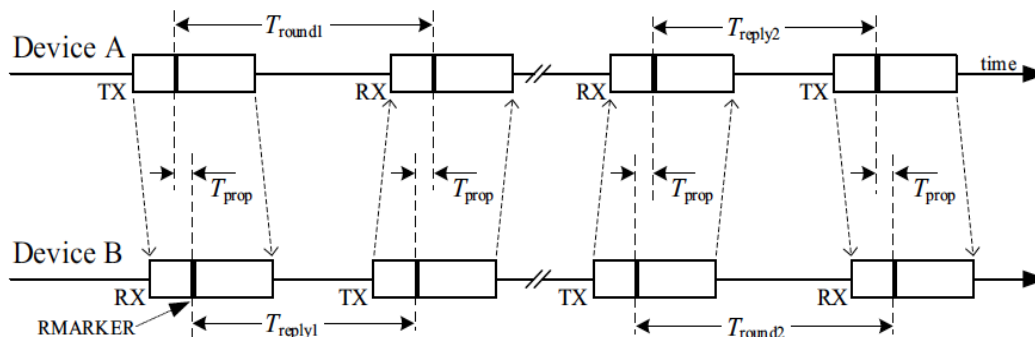
**Fig. 19 -Tecnica di localizzazione SS-TWR [32]**

Come nel caso del ToF, dopo il calcolo della distanza del tag da tre ancore si può ottenere la sua posizione tramite trilaterazione. Qualora non fosse possibile predeterminare il tempo di risposta, questo dovrebbe essere calcolato dal tag dopo la trasmissione ed inviato all'ancora in un altro messaggio.

#### 5.3.4 Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)

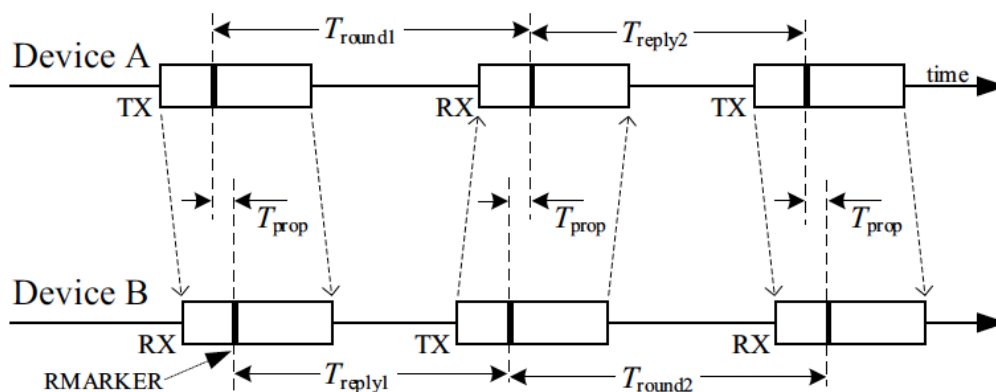
È un'estensione del metodo precedente che consente maggior accuratezza. In sostanza, dopo che un dispositivo ha effettuato il calcolo dell'RTT, anche l'altro lo effettua. Ciascun dispositivo misura precisamente i tempi di trasmissione e di ricezione dei messaggi, e il risultante ToF può essere calcolato con l'equazione:

$$T_{prop} = \frac{(T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2})}{(T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2})}$$



**Fig. 19 -Tecnica di localizzazione DS-TWR [32]**

Questo risulta in uno scambio di quattro messaggi anziché due, che possono però essere ridotti a tre utilizzando la risposta nella prima misura di RTT come iniziatore della seconda misura di RTT.



**Fig. 20 -DS-TWR con 3 messaggi [32]**

### 5.3.5 Angle of Arrival (AoA)

Un altro metodo interessante è il calcolo dell'angolo di arrivo. Per utilizzare questo metodo è necessario che il dispositivo UWB disponga di almeno due antenne. Il funzionamento è simile a quello del ToF, ma dal tempo di arrivo e dalla fase del segnale ricevuto dalle antenne, viene determinata la direzione (angolo) in cui si trova il tag rispetto ad un sistema di riferimento in coordinate polari centrato sull'ancora. Abbinando questo metodo ad uno di quelli che consente di determinare la distanza, è possibile ricavare la posizione del tag con una sola ancora (a condizione che questa disponga di più antenne, come sopra rilevato). Questa tecnica però non è al momento definita in nessuno standard, sebbene sia implementata su molti chip (e.g. Qorvo DW1000, NXP SR150, Apple U1) con tecniche proprietarie.

Ovviamente, per un funzionamento corretto è necessario che tutti i dispositivi coinvolti utilizzino lo stesso metodo di localizzazione. Lo standard FiRa prevede una fase di negoziazione fra trasmettitore e ricevitore.

Grazie a questi meccanismi di funzionamento e alle caratteristiche degli impulsi utilizzati, i sistemi UWB riportano un errore tipico di circa 10 cm, molto inferiore all'errore riportato da tecnologie a banda stretta come WiFi o BLE, la cui accuratezza si limita a circa 1 metro di errore, come illustrato in figura 21.

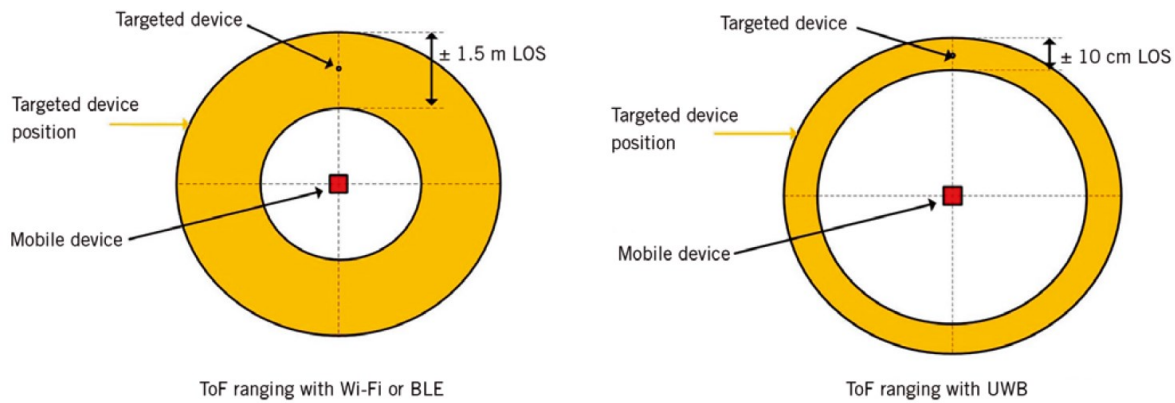


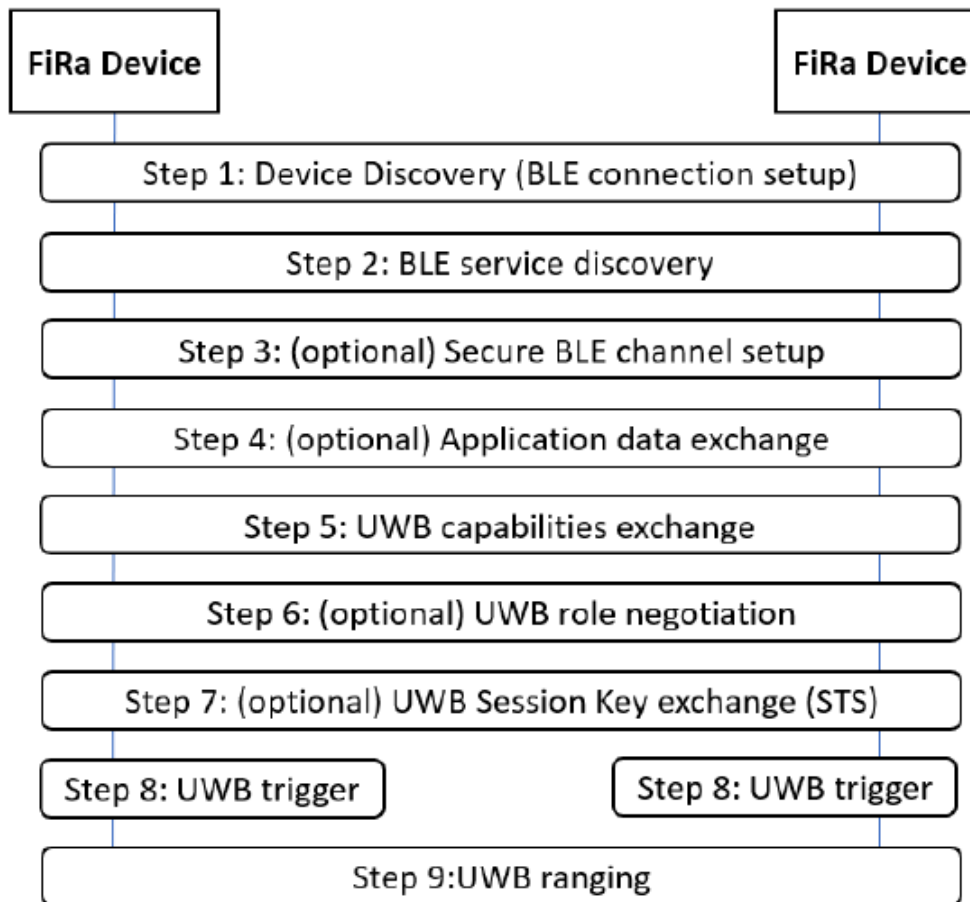
FIGURE 3 ToF ranging with Wi-Fi and BLE (left) versus UWB (right) (© NXP)

**Fig. 21 -Determinazione della distanza con ToF utilizzando Wi-Fi e BLE o UWB [33]**

#### 5.4 Setup della comunicazione

Prima che possa cominciare la comunicazione fra due dispositivi UWB è necessario eseguire il rilevamento dei dispositivi, ovvero il processo in cui un dispositivo UWB ricerca altri dispositivi UWB con cui comunicare. Questo processo non è definito negli standard di IEEE. Generalmente, poiché in un contesto non sincronizzato UWB risulta più energivoro rispetto ad altre tecnologie, il rilevamento di dispositivi viene effettuato attraverso meccanismi fuori banda. In FiRa viene utilizzato Bluetooth Low Energy, richiedendo quindi che i dispositivi utilizzino due interfacce.

La figura 22 descrive il processo di rilevamento. Una volta che due dispositivi si sono rilevati, viene effettuato il rilevamento di servizi BLE ed eventualmente configurato un canale BLE sicuro, attraverso cui vengono scambiati dati dell'applicazione. Successivamente si scambiano informazioni sulle funzionalità di UWB (versione FIRA del PHY, versione FIRA del MAC, etc.) e si stabiliscono i parametri della comunicazione UWB. Dopodiché possono essere concordati facoltativamente i ruoli e si può scambiare la chiave di sessione. Infine, viene attivato il sistema UWB dando avvio alla comunicazione vera e propria.



**Fig. 22 -Procedura di rilevamento dispositivi e e setup per la localizzazione nello standard FiRa [30]**

### **5.5 Evoluzioni future: IEEE 802.15.4ab**

La recente diffusione nel mercato di UWB ha reso necessaria una migliore standardizzazione di questa tecnologia. È stato formato un gruppo per lavorare ad un nuovo emendamento IEEE 802.15.4ab, che affronti i problemi e le lacune dello standard attuale, i cui obiettivi sono:

- miglioramento di accuratezza, precisione, affidabilità ed interoperabilità per ranging ad alta integrità;
- riduzione della complessità e del consumo di potenza;
- introduzione di meccanismi per la ricerca e la configurazione native della comunicazione;
- sviluppo di funzionalità per la rilevazione di presenza e la mappatura ambientale;
- definizione di meccanismi che supportino trasmissioni a bassa potenza e bassa latenza e trasmissioni ad elevata velocità che raggiungano almeno 50 Mbps [34].

## CONCLUSIONE

In conclusione, si può osservare che l'autoveicolo fa un uso estensivo delle comunicazioni wireless. All'esterno, nell'interazione con altri veicoli, con l'infrastruttura e con altri dispositivi quali chiavi e smartphone; all'interno, per il controllo di sensori, per fornire servizi di infotainment al guidatore e ai passeggeri e per controllare parti dell'automobile. La rapida evoluzione di queste tecnologie consente applicazioni sempre più innovative, alcune delle quali sono ormai pronte per l'uso.

I veicoli autonomi, ad esempio, saranno un passaggio di cruciale cambiamento e definiranno il futuro del trasporto su strada: si prevede che l'impiego della mobilità autonoma, una volta pienamente integrata nell'intero sistema dei trasporti contribuirà in modo significativo al perseguimento di importanti obiettivi sociali, quali la realizzazione di una mobilità inclusiva a favore di categorie come anziani e persone con disabilità o l'offerta di "servizi di mobilità" nelle aree non sufficientemente garantite dal trasporto pubblico (attraverso la vendita di corse invece di autoveicoli). La rapida evoluzione tecnologica non può tuttavia sottovalutare le criticità poste dalle modalità di gestione dell'ingente mole di dati, sia sotto il profilo della cybersecurity che della privacy.

Guardando a un futuro più prossimo, è importante evidenziare l'impegno a raggiungere il cosiddetto obiettivo "zero vittime", ossia l'assenza di vittime sulle strade europee entro il 2050, affermato nella Comunicazione della Commissione Europea COM(2018) 283 "Verso la mobilità automatizzata: una strategia dell'UE per la mobilità del futuro".

Nello stesso documento si prevede che "il nuovo mercato dei veicoli automatizzati e connessi cresca in modo esponenziale e che produca benefici economici di grande entità, come, ad esempio, entrate di oltre 620 miliardi di EUR entro il 2025 per l'industria automobilistica e di 180 miliardi di EUR per il settore elettronico dell'UE" [35].

Nel "Piano nazionale sicurezza stradale 2030" del Ministero delle Infrastrutture (paragrafo 5.1.2, Pilastro 2: infrastrutture stradali) si definiscono i sistemi di ITS, che consentono una gestione adattiva della velocità, come "la nuova frontiera" della sicurezza stradale [36].

Progetti come C-Roads Italy, stanno implementando questi sistemi nelle strade italiane: sulla A22, l'autostrada del Brennero, sono state installate 63 Road Side Units (RSU) e sono stati completati oltre 300.000 km di test per il platooning [37].

Il problema principale da affrontare nello sviluppo di queste tecnologie, affinché esprimano pienamente il loro potenziale, è una standardizzazione comune o una soluzione di interoperabilità dei diversi standard.



Possiamo concludere affermando che le tecnologie wireless per il settore automotive, oltre a rappresentare un elemento determinante per il benessere dell'automobilista e la godibilità dei veicoli, costituiscono soprattutto uno strumento fondamentale per il conseguimento degli obiettivi di sicurezza stradale posti dalle istituzioni europee e nazionali.

## FONTI

1. Regolamento UE 2019/2144 del 27 novembre 2019 “Requisiti di omologazione dei veicoli a motore e dei loro rimorchi, nonché di sistemi, componenti ed entità tecniche destinate a tali veicoli, per quanto riguarda la loro sicurezza generale e la protezione degli occupanti dei veicoli e degli altri utenti vulnerabili della strada”.
2. <https://www.abiresearch.com/press/abi-research-forecasts-8-million-vehicles-ship-sae-level-3-4-and-5-autonomous-technology-2025/>
3. <https://www.synopsys.com/automotive/autonomous-driving-levels.html>
4. <https://www.dmove.it/news/in-cina-si-potra-prendere-il-robotaxi-con-guida-autonoma-nvidia-drive-parte-il-servizio-in-unarea-di-pechino>
5. <https://www.agi.it/innovazione/news/2022-08-09/mobilita-prima-volta-cina-arrivano-robotaxi-baidu-17704392/>
6. <https://sicurezzastradaleiso39001.wordpress.com/2019/01/14/la-modalita-dellimpiego-di-veicoli-connessi-digitalmente-in-carovana-conosciuta-come-platooning/>
7. <https://www.cnr.it/it/focus/029-18/apprendimento-automatico-per-la-sicurezza-di-sistemi-veicolari-in-modalita-platooning>
8. <https://www.epicentro.iss.it/stradale/epidemiologia#:~:text=Gli%20incidenti%20stradali%20sono%20la,3%25%20del%20prodotto%20interno%20lordo.>
9. Rhode & Schwarz, Intelligent Transportation Systems Using IEEE 802.11p, [https://www.rohde-schwarz.com/fi/applications/intelligent-transportation-systems-using-ieee-802-11p-application-note\\_56280-15747.html](https://www.rohde-schwarz.com/fi/applications/intelligent-transportation-systems-using-ieee-802-11p-application-note_56280-15747.html).
10. "IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture," in IEEE Std 1609.0-2019 (Revision of IEEE Std 1609.0-2013) , vol., no., pp.1-106, 10 April 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8686445.
11. S. A. M. Ahmed, S. H. S. Ariffin and N. Fisal, “Overview of Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) Protocols and Standards,” Indian Jour. of Sc. and Tech., 2013, vol. 6, no. 7, pp. 4994-5001.
12. G. Naik, B. Choudhury and J. -M. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," in IEEE Access, vol. 7, pp. 70169-70184, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
13. K. Ansari, Joint use of DSRC and C-V2X for V2X communications in the 5.9 GHz ITS band. *IET Intell Transp Syst.* 2021; 15: 213– 224. <https://doi.org/10.1049/itr2.12015>

14. I. Soto, M. Calderon, O. Amador, M. Urueña, A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies, *Vehicular Communications*, Volume 33, 2022, 100428, ISSN 2214-2096, <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100428>.
15. G. Cecchini, A. Bazzi, B. M. Masini and A. Zanella, "Performance comparison between IEEE 802.11p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness," 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2017, pp. 109-114, doi: 10.1109/VNC.2017.8275637
16. A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella and I. Thibault, "On the Performance of IEEE 802.11p and LTE-V2V for the Cooperative Awareness of Connected Vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10419-10432, Nov. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2750803.
17. V. Mannoni, V. Berg, S. Sesia and E. Perraud, "A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X," 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746562.
18. S. Zeadally, et al.: Vehicular communications for ITS: standardization and challenges. *IEEE Commun. Stand. Mag.* 4(1), 11–17 (2020)
19. H. Mei, J. Ding, J. Zheng, X. Chen and W. Liu, "Overview of Vehicle Optical Wireless Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173461-173480, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024854.
20. A. -M. Cailean and M. Dimian, "Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 169-175, April 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600206.
21. Mitsubishi Electric Corporation, "Mitsubishi Electric Develops Object-recognition Camera Technology Using Proprietary AI for Coming Mirrorless Cars", Jan. 2018; [www.mitsubishielectric.com/news/2018/pdf/0117.pdf](http://www.mitsubishielectric.com/news/2018/pdf/0117.pdf).
22. S. Y. Jin, D. Choi, and B. W. Kim, "Optical Vehicle to Vehicle Communications for Autonomous Mirrorless Cars," *Journal of Multimedia Information System*, vol. 5, no. 2, pp. 105–110, Jun. 2018.
23. S. -A. Avătămăniței, A. -M. Căilean, E. Zadobrischi, A. Done, M. Dimian and V. Popa, "Intensive Testing of Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications in Real Outdoor Scenario: Evaluation of a 50 meters link in Direct Sun Exposure," 2019 Global LIFI Congress (GLC), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLC.2019.8864129.
24. A. -M. Căilean and M. Dimian, "Toward Environmental-Adaptive Visible Light Communications Receivers for Automotive Applications: A Review," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 2803-2811, May1, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2529019.

25. T. Nawaz, M. Seminara, S. Caputo, L. Mucchi, F. S. Cataliotti and J. Catani, "IEEE 802.15.7-Compliant Ultra-Low Latency Relaying VLC System for Safety-Critical ITS," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 12, pp. 12040-12051, Dec. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2948041.
26. A. Cailean, M. Dimian and A. Done, "Enhanced design of visible light communication sensor for automotive applications: Experimental demonstration of a 130 meters link," 2018 Global LIFI Congress (GLC), Paris, 2018, pp. 1-4. doi: 10.23919/GLC.2018.8319100
27. B. Béchadergue, C. Dominguez, A. Pesala, P. Chandra, G. Allegretto and S. Richer, "Vehicle-to-Vehicle Optical Wireless Communication with the Smart Corner™ Automotive Headlamp," 2019 Global LIFI Congress (GLC), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLC.2019.8864116.
28. K. T. Le, "Bluetooth low energy and the automotive transformation", Sep. 2017, <https://www.ti.com/lit/wp/sway008/sway008.pdf?ts=1667511598542>.
29. <https://www.firaconsortium.org/discover/technical-faq>
30. D. Coppens, A. Shahid, S. Lemey, B. Van Herbruggen, C. Marshall and E. De Poorter, "An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions," in IEEE Access, vol. 10, pp. 70219-70241, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187410.
31. <https://www.nxp.com/design/training/future-rf-technologies-ultra-wideband-for-car-access-part-2-uwband-automotive-use-cases:TIP-PART-2-UWB-AUTOMOTIVE-USE-CASES>
32. "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYS) and Associated Ranging Techniques," in IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020) , vol., no., pp.1-174, 25 Aug. 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9179124.
33. R. Al-Kadi, C. Zorn, Ultra Wideband - How It Works and Its Web of Potential. ATZ Electronics Worldwide 15, 46–51 (2020). <https://doi.org/10.1007/s38314-020-0168-4>
34. <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4ab.html>
35. Comunicazione della Commissione Europea al Parlamento europeo, al Consiglio europeo, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle Regioni del 17 maggio 2018, Verso la mobilità automatizzata: una strategia dell'UE per la mobilità del futuro, COM (2018) 283 final.
36. [https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-06/PNSS%20def\\_10.pdf](https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-06/PNSS%20def_10.pdf)
37. <https://www.lastampa.it/motori/attualita/2021/09/18/news/autobrennero-laboratorio-italiano-del-truck-platooning-il-futuro-del-trasporto-pesante-1.40715163/>