

UNIVERSITÀ DI PISA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica

Reti Wireless WiFi7: Prestazioni e Casi d'Uso

Candidato:
Alessandro Fossari

Relatori:
Prof. Giuseppe Anastasi
Prof.ssa Francesca Righetti
Dott. Marco Pettorali

Anno Accademico 2023/2024

Is that a stain? You should change.
Are you doing good?



Did you solve all of your problems?

Tavola dei contenuti

0.1	Tabella degli acronimi	4
0.2	Introduzione	6
1	La famiglia WiFi	7
1.1	Background della comunicazione senza fili	7
1.2	Concetti di base per una WLAN	9
1.2.1	Gli MPDU	9
1.2.2	Metodi di accesso al canale	9
1.3	Cenni storici	10
1.4	WiFi6	11
1.5	Verso un nuovo standard	11
2	WiFi7	12
2.1	EHT PHY	12
2.2	Il MAC layer 802.11be	13
2.3	Time Sensitive Networking	13
2.4	EDCA	14
2.5	Multi-Link Operations	15
2.5.1	Tipologie di MLO	16
2.5.2	Upper e lower MAC	17
2.5.3	Gestione della QoS	18
2.5.4	MLO e casi d'uso	20
2.6	Restricted Target Wake Time	21
2.6.1	QoS	21
2.6.2	TWT	22
2.6.3	r-TWT e QoS: un caso d'uso	23
2.7	La priorità EPSCS	23
2.7.1	Controversie su EPSCS	25
3	Risultati sperimentali	26
3.1	I vantaggi delle MLO	26
3.2	Misurazioni sul campo	28
3.2.1	La configurazione di rete	29
3.2.2	Setup delle misurazioni	29
3.2.3	Speedtest	30
4	Confronti con altre tecnologie	34
4.1	Altre tecnologie	35
4.1.1	5G URLLC	35
4.1.2	LiFi	36
4.1.3	TSCH	36
5	Conclusioni	38
6	Epilogo	40

0.1 Tabella degli acronimi

Sigla	Nome completo
ACK	Acknowledgment
AIFS	Arbitration Inter-Frame Spacing
AP	Access Point
BE	Best Effort
BK	BacKground traffic
BSS	Basic Service Set
B-TWT	Broadcast-TWT
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DL	DownLoad
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EHT	Extremely High Throughput
EPCS	Emergency Preparedness Communication Service
eMLMR	Enhanced MLMR
eMLSR	Enhanced MLSR
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
LiFi	Light Fidelity
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLD	Multi Link Device
MLMR	Multi Link Multi Radio
MLO	Multi Link Operation
MLSR	Multi Link Single Radio
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MU-MIMO	Multiple User MIMO
NSTR	Non STR
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Multiple Access
PHY	PHYsical
QoS	Quality of Service
RTA	Real Time Application
RTS/CTS	Ready To Send/Clear To Send
R-TWT	Restricted TWT
SCS	Stream Classification Service
SLO	Single Link Operation
SP	Service Period
SSID	Service Set IDentifier
STA	Station
STR	Simultaneous Transmit and Receive
SU-MIMO	Single User MIMO
TID	Traffic IDentifier
TSCH	Time Slotted Channel Hopping
TSN	Time Sensitive Networking
TWT	Target Wake Time
TXOP	Transmission Opportunity
UL	UpLoad
VI	VIdeo

VO	VOice
WLAN	Wireless LAN
5G URLLC	5G Ultra-Reliable Low Latency Communication

Table 1: Tabella degli acronimi.

0.2 Introduzione

Le reti locali wireless hanno subito una costante evoluzione durante ultimi decenni, diventando una tecnologia essenziale per la comunicazione moderna. Dallo sviluppo delle prime reti senza fili alle sue attuali versioni, il progresso tecnologico ha migliorato significativamente la velocità, l'affidabilità e la gestione delle risorse di rete della comunicazione WiFi sia in ambito domestico che professionale.

L'ultima evoluzione dello standard, *WiFi7 (IEEE 802.11be)*, è stata progettata per rispondere alle nuove esigenze del mercato, caratterizzate da una crescente domanda da parte delle applicazioni wireless di nuovi miglioramenti nell'ambito della larghezza di banda, della riduzione della latenza ed dell'efficienza energetica. Con la diffusione di applicazioni avanzate, quali lo streaming ad alta definizione, il cloud gaming, la realtà aumentata e le comunicazioni industriali in tempo reale, diventa essenziale poter contare su una rete wireless capace di garantire prestazioni elevate e una gestione efficiente delle risorse.

Questo elaborato analizza le innovazioni introdotte da WiFi7, evidenziandone le potenzialità nei diversi contesti applicativi. Dopo un'analisi delle migliorie apportate al livello fisico, vengono approfonditi gli aggiornamenti del MAC layer, tra cui le Multi-Link Operation, la revisione di EDCA per consentire una migliore QoS, il Restricted-Target Wake Time e la priorità EPCS. Successivamente, sono presentati dei risultati sperimentali che valutano le prestazioni della nuova tecnologia in scenari con elevata densità di dispositivi e condizioni di traffico variabili. Un'attenzione particolare è dedicata ai meccanismi di accesso al canale e alla capacità dello standard di mitigare interferenze e congestioni. Infine, il testo propone un confronto tra WiFi7 e gli standard precedenti (WiFi6 e WiFi6E) ed altre tecnologie di comunicazione wireless, come 5G, TSCH e LiFi.

L'adozione di WiFi7 promette di migliorare significativamente le prestazioni delle reti wireless, rendendole più adatte a scenari con elevata richiesta di banda e bassa latenza. Come vedremo, le funzionalità introdotte consentono di ottimizzare l'utilizzo dello spettro, migliorare l'affidabilità della connessione e offrire maggiore flessibilità nella gestione delle risorse di rete, a condizione che le infrastrutture esistenti vengano aggiornate alla nuova versione, la quale riesce in ogni caso a mantenere la completa retrocompatibilità con gli standard precedenti.

Chapter 1

La famiglia WiFi

Definito dall'*IEEE*¹ e più comunemente riferito come *WiFi*, lo standard *IEEE802.11* si occupa di uniformare la comunicazione senza fili tra dispositivi connessi ad una stessa *rete locale wireless (WLAN)*. L'accesso alla rete si basa su una struttura a più livelli, ciascuno dei quali semplifica la complessità del livello sottostante, e che in gergo si chiama *pila Internet*². WiFi si occupa dei due livelli più bassi:

- *Physical (PHY)*: si occupa di trasmettere e ricevere i segnali radio, traducendo i dati digitali in segnali elettromagnetici e viceversa.
- *Media Access Control (MAC)*: implementa meccanismi di accesso al canale condiviso risolvendo i problemi di collisione e si occupa dello scambio di dati tra dispositivi all'interno della stessa LAN.

Argomento centrale di questo elaborato sarà il secondo dei due layer, essendo quello che trascura gli aspetti telecomunicazionisti dello standard.

1.1 Background della comunicazione senza fili

Perché le comunicazioni wireless ad uso domestico siano possibili, lo spettro di comunicazione attorno alle frequenze 2.4, 5 e 6GHz³ è lasciato *unlicensed* dagli enti governativi, ovvero non assegnato a nessuna particolare applicazione. Sono generati in questo intervallo di frequenza i segnali WiFi, *Bluetooth*, satellitari e persino quelli generati dai fornì microonde.

L'*etere*, il mezzo nel quale si propagano i segnali radio, è, benché comodo, un pessimo canale di comunicazione. È infatti:

- Inaffidabile: qualsiasi altra sorgente radio può generare interferenza, più o meno evidente. Anche nell'ambiente meno affollato esisterà sempre ed in ogni caso del rumore di sottofondo⁴ e, come se non bastasse, lo stesso segnale trasmesso può riecheggiare e collidere con sé stesso incidendo sulla sua qualità.
- Instabile: variazioni di temperatura, pressione o nella morfologia dello spazio attorno ad un trasmettitore rendono imprevedibile conoscere a priori la qualità del canale.
- Insicuro: il mezzo è condiviso e non vi è certezza che tutti i dispositivi entro il raggio di comunicazione siano benevoli. Qualsiasi altro ricevitore in ascolto con la corretta apparecchiatura può captare i nostri messaggi⁵.

¹Institute of Electrical and Electronics Engineers.

²Dal più astratto, i livelli della pila sono in ordine: "applicazione", "trasporto", "network", "MAC" e "fisico".

³Più volte in questo testo faremo riferimento agli Hz. Un *Hertz* è l'unità di misura della frequenza. Il prefisso *G* indica che si parla di *Giga-Hertz*, ovvero 10^9 Hz.

⁴Un parallelismo tangibile è il fischio nelle orecchie che sentiamo in situazioni di estremo silenzio.

⁵Un esempio sono le comunicazioni delle forze dell'ordine: chiunque potrebbe ascoltarle, semplicemente la legge vieta di farlo.

- Half-duplex⁶: a differenza di uno cablato, un canale wireless non consente una comunicazione full-duplex simultanea (ad un dato istante è possibile solo ricevere o trasmettere). Per questo motivo è impossibile per un dispositivo "ascoltare" il canale durante le trasmissioni per accertarsi che il mezzo sia libero.

I dispositivi di telecomunicazione si avvalgono di particolari meccanismi di modulazione e filtraggio per eliminare i segnali esterni ad un certo intervallo di frequenze⁷. Le collisioni tra segnali attorno allo stesso intervallo di frequenze restano possibili.

Per far fronte al problema, i dispositivi implementano delle soluzioni via software: le *Distributed Coordination Function (DCF)*. Si tratta di procedure di accesso al canale seguite da qualsiasi trasmettitore, in modo che i messaggi possano essere recepiti dai destinatari senza alcuna collisione.

WiFi, in particolare, fa uso di ulteriori meccanismi di partizionamento del canale in termini di spazio, tempo e frequenza in modo da assegnare ognuno degli *slot* a disposizione ad una comunicazione tra dispositivi:

- *Orthogonal Frequency Multiple Access (OFDMA)*: il canale viene suddiviso sia in termini di tempo che frequenza. Il processo viene amministrato dall'AP che, attraverso dei messaggi di controllo detti *trigger frame*, comunica alle STA quali slot utilizzare. Sempre sua responsabilità è schedulare le risorse di rete in modo da ridurre al minimo la probabilità che più comunicazioni utilizzino lo stesso slot.
- *Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)*: un trasmettitore munito di più antenne può utilizzarle in maniera indipendente per concentrare i *flussi di dati* generati da ciascuna di esse verso una particolare direzione. Il fatto che ciò sia possibile permette di restringere lo spazio coperto dai segnali, di fatto consentendo una comunicazione parallela con più dispositivi a patto che questi siano *abbastanza distanti* tra loro. Una comunicazione MIMO può essere impiegata in due diverse modalità:
 - *Single-User MIMO (SU-MIMO)*: indirizzando i diversi flussi di dati verso un singolo dispositivo viene di molto aumentata la qualità della comunicazione. Viene solitamente evitata in contesti in cui la rete ha dimensioni importanti, in quanto concedere tutte le antenne ad una comunicazione per volta potrebbe divenire un punto di bottleneck⁸.
 - *Multiple-User MIMO (MU-MIMO)*: dirigendo almeno un flusso di dati verso ognuno dei dispositivi in ascolto è possibile gestirli in maniera concorrente. Aumenta la capacità complessiva della rete ma ne risente la qualità del segnale; è per questo che solitamente vengono impiegati più flussi di dati per comunicazione.

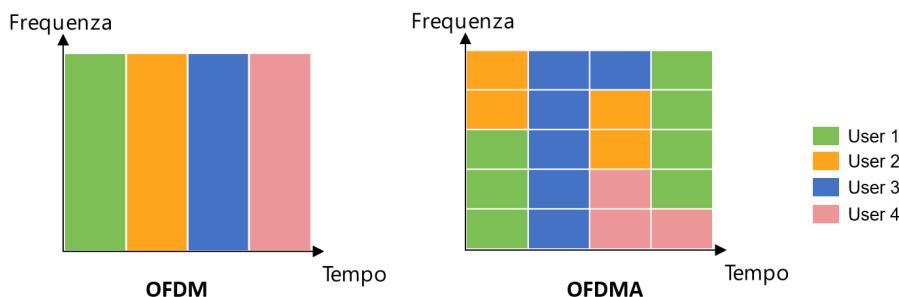


Figure 1.1: Confronto tra OFDMA ed il suo predecessore, OFDM. Ognuno dei rettangoli sul grafico rappresenta uno slot: si noti come OFDMA riesca a gestire ad un dato istante più comunicazioni per volta.

⁶Una comunicazione che "funziona in una sola direzione", in opposizione ad una *full-duplex* che "funziona in due direzioni".

⁷Un modulatore è in grado di traslare un segnale verso una diversa frequenza portante; un filtro seleziona particolari intervalli di frequenza.

⁸In italiano "collo di bottiglia", un punto di un'architettura che ne rallenta tutto il funzionamento.

1.2 Concetti di base per una WLAN

Una rete WiFi è una struttura centralizzata che si sviluppa attorno ad un *Access Point (AP)*, il dispositivo che consente a tutti gli altri, detti *stations (STA)*, che si autenticano presso di esso ad accedere alla rete. Ogni AP può essere univocamente individuato da un *Service Set Identifier (SSID)*⁹. L'AP e l'insieme dei dispositivi ad esso connessi forma un *Basic Service Set (BSS)*. Essendo l'AP il cuore della WLAN, lo scambio di informazioni avviene in due direzioni:

- *Upload (UL)*: dalle STA all'AP e l'esterno della rete.
- *Download (DL)*: dall'esterno, all'AP alle STA.

Sebbene il raggio di copertura di un BSS dipenda dalla frequenza dei segnali scambiati e dalle condizioni ambientali, il suo valore è compreso tra i 20 ed i 100 metri.

1.2.1 Gli MPDU

Per fare riferimento ai messaggi scambiati sul livello MAC utilizzeremo il termine *frame*¹⁰ o *MAC Protocol Data Unit (MPDU)*.

Unità di comunicazione dei messaggi a livello MAC, un MPDU si compone di un *header* che contiene le informazioni di controllo ed instradamento, di un *payload* che contiene le vere e proprie informazioni e di un *trailer* che introduce informazioni ridondanti perché siano riconosciuti eventuali errori. Contenuto nell'header, il campo *Frame Control* raggruppa su 16bit informazioni che

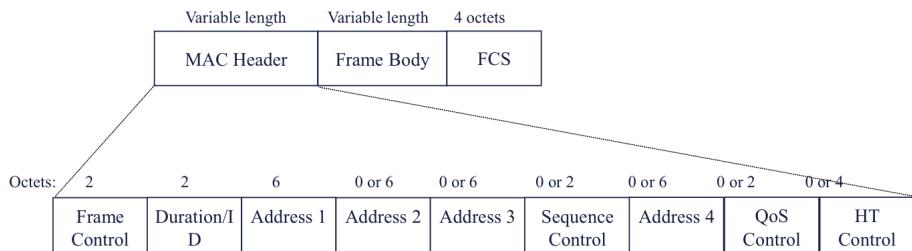


Figure 1.2: La struttura di un MPDU.

descrivono il frame stesso, tra cui il suo tipo. In funzione di quest'ultimo, il frame assume un particolare ruolo:

- Management: riguarda operazioni di scoperta della rete, di autenticazione o associazione ad essa. Un esempio di frame di questo tipo sono gli *action frame*, dei particolari messaggi utilizzati perché un host possa, appunto, scatenare particolari azioni da parte di un altro nella stessa LAN.
- Data: frame per il vero e proprio scambio di informazioni che possono essere trovate nel payload.
- Control: relativo ad operazioni di controllo come lo scheduling delle risorse di canale. Appartengono a questa categoria i trigger frame utilizzati in WiFi6.

1.2.2 Metodi di accesso al canale

All'arrivo di nuovi dati da inviare, il livello MAC compone un nuovo MPDU ed il trasmettitore accede al canale attraverso una DCF; quella utilizzata in WiFi prende il nome di *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)* e si compone di più passi:

1. Il dispositivo ascolta il canale. Se è libero per un certo intervallo di tempo, detto *DIFS*, trasmette il suo frame. Fatto questo, si salta al passo (3).

⁹Il nome della rete che vediamo nella lista di quelle disponibili quando "accendiamo il WiFi".

¹⁰Ogni livello della pila ha un suo nome per i pacchetti scambiati.

2. Se si rileva una trasmissione in corso si sceglie allora un *valore di backoff* secondo un certo criterio. Si attende per la durata del backoff; se si rileva una nuova trasmissione in questa fase il conteggio si ferma per la durata di quest'ultima. Allo scadere si ritorna al passo (1).
3. Si attende un altro intervallo di tempo, detto *SIFS*¹¹ perché sia ricevuto un ACK di confermata ricezione. Se questo non avviene si da per perso il messaggio e si ritorna al punto (1).

La durata di una trasmissione completa è detta *Transmission Opportunity (TXOP)*.

In scenari con elevate collisioni e un alto volume di dati, un trasmittitore può tentare di riservare il canale per sé, evitando di trasmettere i frame singolarmente e riducendo le attese ripetute. Per farlo si avvale dell'algoritmo Ready To Send/Clear To Send (RTS/CTS): attraverso il frame di management *RTS* la STA comunica all'AP l'intenzione di possedere il canale per un certo intervallo di tempo; l'AP comunica a tutte le STA l'esito della richiesta con un *CTS*, in modo che le altre non interferiscano.

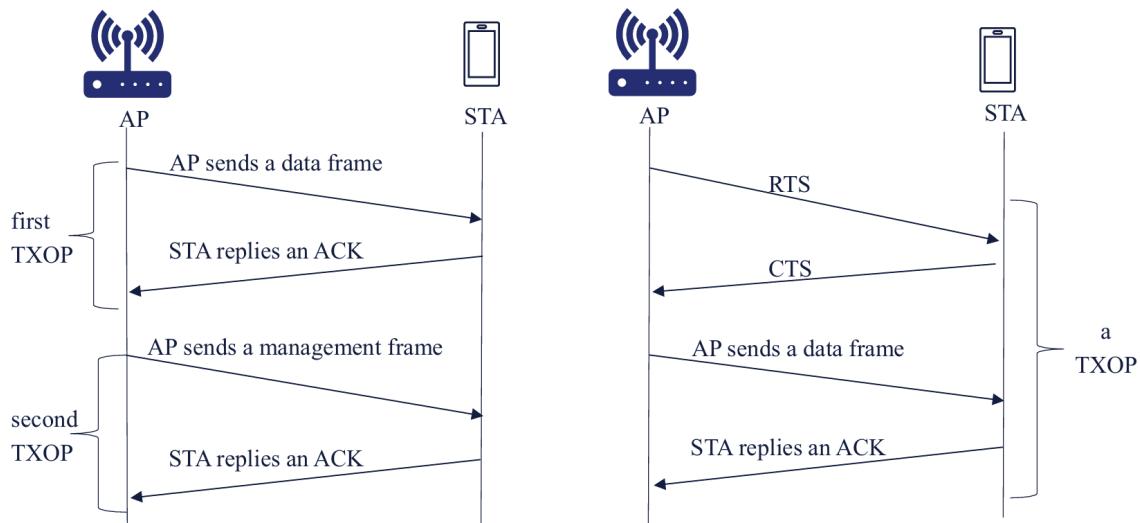


Figure 1.3: Due metodi di accesso al canale: CSMA/CA (sinistra) e RTS/CTS (destra).

1.3 Cenni storici

La prima versione dello standard WiFi, denominata *802.11-1997* come l'anno di rilascio, fu pensata per la comunicazione a corto raggio e a bassa velocità (si parla di 2Mbps¹²) attorno alla frequenza portante 2.4GHz, che avrebbe dovuto trovare impiego in applicazioni prettamente industriali, come i lettori barcode dei magazzini.

Due anni più tardi, *802.11b* e *802.11a* vengono rilasciati con lo scopo di estendere le funzionalità della precedente versione. A causa di problemi di autorizzazione sulla banda 5GHz, la versione 802.11a non venne mai veramente apprezzata, sebbene offrisse un throughput¹³ anche cinque volte superiore a 802.11b, attraverso l'impiego dell'*Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, precursore di OFDMA.

Solo nel 2003, con il lancio di *802.11g*, le stesse performance di 802.11a saranno disponibili nella banda 2.4GHz.

La prima grande svolta della tecnologia avviene con *802.11n*: detto anche *WiFi4*, è la prima

¹¹La durata dei due intervalli è sempre tale che SIFS < DIFS: se così non fosse eventuali trasmittitori interferirebbero con la ricezione dell'ACK.

¹²La sigla Mbps si riferisce a *Mega-bit-per-secondo*, da non confondere con MBps, ovvero *Mega-byte-per-secondo*. Un Mb equivale a 2^{20} bit, mentre un MB a 2^{20} byte, ovvero 2^{23} bit, essendo un byte pari ad 8 bit.

¹³Con questo termine si fa riferimento alla *portata* di una connessione, ovvero il volume dei dati scambiati per unità di tempo.

versione dello standard ad operare sia in banda 2.4GHz che 5GHz, a fare uso della comunicazione MIMO per consentire agli AP di intraprendere più comunicazioni parallele con le STA e ad avvalersi dell'aggregazione di più canali radio per aumentare la capacità della rete.

Il successivo *802.11ac*, detto *WiFi5*, torna ad operare completamente in banda 5GHz, ora meglio regolamentata, ed implementa il supporto per la comunicazione su più canali di lunghezza diversa. Inoltre, è la prima versione del protocollo a riuscire a raggiungere 1Gbps in throughput. Il successo della tecnologia spinge la WiFi Alliance¹⁴ ad effettuare un secondo rilascio, *WiFi5 wave 2*, per supportare la comunicazione MIMO ad otto flussi di dati.

1.4 WiFi6

La versione *802.11ax* è risultata fondamentale nello sviluppo della versione successiva dello standard. Rilasciato nel 2019 e presentato come WiFi6, l'obiettivo principale del protocollo era quello di ottimizzare l'utilizzo dello spettro di comunicazione: l'ente di standardizzazione aveva preso nota del fatto che gestire in maniera più efficiente le risorse del canale avrebbe permesso di aumentare significativamente la capacità della rete. Per il fenomeno delle collisioni infatti, era divenuto più difficile per i dispositivi comunicare efficientemente, soprattutto nel caso di più BSS sovrapposte. Per fare fronte al problema, WiFi6 impiega per la prima volta OFDMA, tecnica che riesce ad aumentare di molto sia la velocità della connessione che la sua capacità, permettendo di raggiungere un throughput massimo di 9.6Gbps.

Come con la precedente, anche il successo di questa versione spinge la WiFi Alliance a rilasciare un aggiornamento. Si tratta di *WiFi6E*, o *WiFi6 Extended*, e permette per la prima volta di accedere alla nuova banda 6GHz, la terza fascia di frequenze ora disponibile alla tecnologia WiFi. Questo nuovo ampliamento dello spettro di frequenza rende possibile alle applicazioni di scegliere quale portante utilizzare, avendo ognuna di essere caratteristiche diverse: mentre un segnale a 2.4GHz riesce a coprire un'area maggiore, questa fascia è sicuramente la più affollata e con meno canali a disposizione; avvicinandosi verso le portanti a frequenza maggiore invece, sebbene il raggio delle trasmissioni vada riducendosi, la probabilità di una collisione diminuisce grazie all'aumento del numero di canali disponibili e, paradossalmente, al raggio più corto dei segnali trasmessi.

Grandi passi avanti sono stati fatti in WiFi6 riguardo la riduzione delle collisioni: oltre che ai già nominati OFDMA e MIMO, vengono per la prima volta utilizzati i trigger frame per schedulare le risorse di rete e lo *spatial reuse* per controllare la potenza di trasmissione perché sia appena sufficiente per garantire la comunicazione ma allo stesso tempo il più ridotta possibile in modo da non interferire con le altre ad essa "confinanti".

1.5 Verso un nuovo standard

I tempi cambiano in fretta e l'evoluzione delle applicazioni wireless non ha fatto altro che spingere sulla WiFi Alliance perché fosse rivisto il meccanismo di gestione delle *Real Time Applications (RTA)*, quella classe di applicazioni che richiede una comunicazione a delay¹⁵ minimo anche in contesti in cui la rete raggiunge la capacità massima. In questo ambiente, la divisione tra i messaggi sensibili al ritardo (*time sensitive*) e quelli meno urgenti (*best effort*) non può che accentuarsi.

Fino ad ora WiFi ha soddisfatto il traffico RTA come poteva, ma le sue funzionalità cominciano a non essere più sufficienti alle richieste del mercato. Settori come il gaming online competitivo, lo streaming di contenuti in alta definizione, le videoconferenze professionali e le piattaforme cloud richiedono connessioni sempre più affidabili e con latenze ridotte. Anche in ambito industriale e medico la telemedicina e la meccanica robotica necessitano di reti che garantiscono una risposta veloce ed una perdita di dati minima. Infine, con l'evoluzione della domotica e dell'*Internet of Things (IoT)*, cresce la necessità di reti wireless capaci di gestire un numero sempre maggiore di dispositivi contemporaneamente senza che vadano a risentirne le prestazioni.

Parole chiave della nuova tecnologia dovranno quindi essere "velocità", "scalabilità", "bassa latenza" ed "affidabilità".

¹⁴Si tratta dell'ente di standardizzazione del protocollo, formata da diverse aziende del settore.

¹⁵Traduzione inglese dei termini "ritardo" o "latenza", una quantità da ridurre il più possibile.

Chapter 2

WiFi7

Lo standard *IEEE 802.11be*, o più comunemente *WiFi7*, viene presentato dal *Task Group be (TGbe)* come un’ambiziosa introduzione alle reti wireless *Extremely High Throughput*¹ (*EHT*). Rilasciato ufficialmente a maggio 2024, lo standard rappresenta un significativo passo avanti nell’evoluzione delle reti Wi-Fi, con l’obiettivo di migliorare le prestazioni, l’efficienza e l’affidabilità delle comunicazioni wireless.

Questa nuova versione intende mantenere la compatibilità con le tecnologie esistenti ma rivedendo la parte bassa della pila Internet. L’attenzione si concentra sulla riduzione della latenza, sull’ottimizzazione dello spettro di comunicazione e sul supporto a nuovi scenari applicativi. Queste innovazioni rendono lo standard particolarmente adatto agli ambienti ad alta densità di BSS e alle applicazioni che richiedono connessioni più stabili e veloci.

2.1 EHT PHY

Per capire pienamente le tecniche a disposizione del layer superiore diviene necessario analizzare le innovazioni introdotte nello strato più basso della pila protocollare.

Con PHY si fa riferimento allo strato meno astratto della pila Internet, ovvero l’interfaccia diretta tra i dispositivi ed il canale, gestendo la conversione dei dati in segnali elettromagnetici e determinando le modalità con cui questi vengono trasmessi.

Le novità introdotte dal PHY layer sono da sole in grado di aumentare di gran lunga le performance di WiFi ed è impossibile ignorarne il contributo. Gran parte dei miglioramenti ottenuti con questo standard derivano proprio dalle ottimizzazioni apportate in tale strato, ormai ribattezzato *Extremely High Throughput PHY*.

Per quanto non si tratti del punto centrale di questo elaborato, analizziamo cosa viene esteso e rivisto dal precedente WiFi6:

- MIMO: il numero massimo di flussi spaziali supportati viene raddoppiato, passando da 8 a 16, per consentire una migliore parallelizzazione delle trasmissioni.
- Larghezza di banda: il suo valore massimo passa da 160 MHz a 320 MHz, permettendo di trasportare un volume di dati significativamente maggiore che porta ad una riduzione del tempo impiegato nelle trasmissioni.
- Modulazione: l’adozione della modulazione 4096-QAM consente di codificare una quantità maggiore di dati per simbolo trasmesso², migliorando l’efficienza spettrale e garantendo un throughput superiore, a discapito però della sensibilità ai disturbi.
- Interfacce parallele: i dispositivi sono ora in grado di sfruttare più interfacce fisiche per comunicare in maniera parallela.
- Frame fisici: la loro struttura viene rivista per integrare le nuove funzionalità, restando però compatibili con le versioni precedenti.

¹Reti wireless a portata estremamente alta.

²Una QAM associa a serie di bit una coppia di ampiezza e fase di un segnale, detta simbolo.

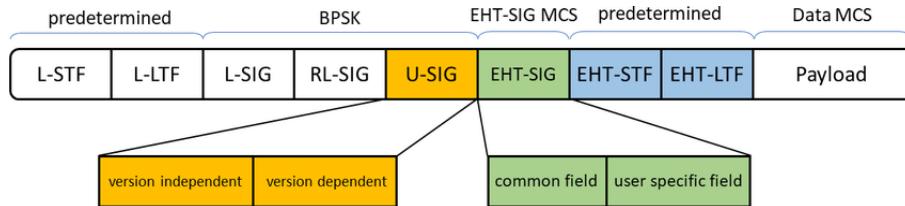


Figure 2.1: I nuovi campi dell'header di un frame fisico. I frame fisici rappresentano l'unità fondamentale della comunicazione PHY e contengono nel campo *payload* i dati provenienti dal livello superiore, ovvero il MAC.

Da EHT PHY dipende il raggio di copertura di un AP WiFi7 che, in questa versione, non aumenta in maniera significativa. Anche se, in generale, è la scelta della portante di trasmissione ad incidere principalmente sulla distanza coperta dal segnale, la modulazione 4096-QAM soffre il rumore molto più della sua controparte WiFi6: per questo motivo, il raggio di copertura della tecnologia resta sui 30m negli ambienti interni e sui 120m negli esterni.

In ogni caso, presa nota dell'aumento della larghezza di banda, della nuova modulazione impiegata e delle altre migliorie, EHT PHY riesce, da solo, ad incrementare il throughput della comunicazione di un fattore 4.8x rispetto alla versione precedente: se si tiene conto del fatto che WiFi6 raggiungeva un throughput massimo di 9.6Gbps si ottiene in WiFi7 un valore teorico di 46Gbps. EHT PHY non riuscirebbe però a far fronte a congestioni e collisioni: è quindi necessario agire sul MAC layer perché si faccia buon uso di un throughput tanto alto.

2.2 Il MAC layer 802.11be

Il livello MAC è responsabile della regolazione dell'accesso al canale e della gestione delle comunicazioni tra i dispositivi ed in questa nuova iterazione dello standard viene notevolmente migliorato. Le innovazioni più rilevanti riguardano l'implementazione e la gestione delle operazioni parallele, l'introduzione di meccanismi di risparmio energetico e la possibilità di prioritizzare il traffico in situazioni di emergenza. Nello specifico, le principali novità introdotte includono:

- *Multi-Link Operations (MLO)*: pur avendo a disposizione le bande 2.4, 5 e 6GHz, prima di WiFi7 i dispositivi non erano in grado di utilizzarle simultaneamente. Le trasmissioni erano costrette ad un'unica banda alla volta limitandone l'efficienza, un ostacolo non più esistente da questa versione, la quale introduce ora il supporto ad un loro utilizzo parallelo attraverso tecniche che vedremo nel dettaglio.
- *Restricted Target Wake Time (r-TWT)*: estendendo l'algoritmo di TWT già implementato in WiFi6 con lo scopo di ridurre il consumo energetico dei dispositivi, il TGbe ha messo a punto una sua variante, appunto il r-TWT, che non solo conserva le funzionalità della sua versione precedente, ma agisce ora come un potente strumento di scheduling delle comunicazioni da impiegare soprattutto negli scenari di traffico con vincoli temporali stringenti.
- *Emergency Preparedness Communications Services (EPCS)*: in caso di estrema necessità la connettività diviene un fattore molto importante. Per garantire che le comunicazioni essenziali non risentano delle congestioni di rete, WiFi7 introduce la possibilità per alcuni dispositivi autorizzati di venire contrassegnati come *ad alta priorità*. Nel caso di eventi drammatici quali cataclismi o perfino attacchi terroristici, un meccanismo come l'EPCS consente a soccorritori e forze dell'ordine di avvalersi delle infrastrutture WiFi per comunicare anche in caso di congestione.

2.3 Time Sensitive Networking

A più riprese la comunità ha provato ad affrontare il problema della comunicazione soggetta a ristretti vincoli temporali, noto come *Time Sensitive Networking (TSN)*. Questo ambito di ricerca

è particolarmente rilevante per applicazioni critiche come l'automazione industriale, i sistemi di controllo in tempo reale e la comunicazione tra veicoli, dove la latenza della comunicazione è sottoposta a vincoli stringenti. Diverse soluzioni sono state sviluppate e adottate nel contesto delle reti *Ethernet*³ dove la natura cablata del canale consente di implementare con maggiore facilità meccanismi di coordinazione tra i dispositivi. Per questa ragione solo un ristretto sottoinsieme di queste soluzioni può essere applicato anche alle reti WiFi.

In una rete nella quale vengono scambiati sia flussi di traffico time sensitive che best effort, una delle possibili soluzioni riguarda la possibilità di troncare qualsiasi trasmissione non urgente all'arrivo di un messaggio time sensitive perché questo venga trasmesso il prima possibile; per quanto questa soluzione possa sembrare facilmente implementabile se i messaggi sono trasmessi da uno stesso host, nel caso questo accada in una rete con più trasmettitori è necessaria una loro coordinazione che diviene difficile da intraprendere quando il canale è saturo. Questa non è che una delle soluzioni applicabili solo ad Ethernet: sfruttando il funzionamento del *CSMA/CD*⁴, il trasmettitore con un messaggio urgente può forzare una collisione, troncando qualsiasi altra trasmissione in corso per liberare il canale; questo metodo non è applicabile alle reti WiFi per una ragione strutturale: a differenza delle reti cablate, in cui è possibile rilevare una collisione in tempo reale, nel wireless un nodo trasmettitore non è in grado di ascoltare il canale mentre sta trasmettendo.

Una possibile soluzione sarebbe quella di implementare un sistema di coordinazione tra gli host ad una frequenza dedicata su un canale parallelo a quello dello scambio dei dati vero e proprio; questa strategia solleva però problemi di compatibilità con gli standard già esistenti e potrebbe interferire con i meccanismi di accesso al mezzo già in uso.

Il meccanismo già utilizzato in WiFi6 dei trigger frame è probabilmente la migliore delle opzioni disponibili, ma anche in questo caso l'infedeltà del canale non assicura che i frame di controllo vengano ricevuti dalle STA in caso di congestione o interferenza da parte di reti vicine; l'unico modo per mitigare questo problema diviene adottare un meccanismo di *admission control* in cui tutti i dispositivi rispettano una politica condivisa e occupano il canale solo se la trasmissione non rischia di generare congestione. Questo approccio richiede che tutti i dispositivi rispettino le stesse regole di gestione del traffico.

2.4 EDCA

Già introdotto in WiFi6 per migliorare la gestione del TSN, l'*Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)* è un meccanismo che suddivide il traffico in più *access categories*⁵, ciascuna associata ad una diversa urgenza di trasmissione; in ordine di priorità decrescente le quattro categorie sono:

- *Voce (VO)*: streaming audio e comunicazioni vocali.
- *Video (VI)*: streaming video.
- *Best effort (BE)*: traffico senza particolari requisiti di priorità, come la navigazione web.
- *Background traffic (BK)*: traffico che non soffre la latenza, come il download di file.

L'assegnazione della categoria EDCA di appartenenza viene espressa nel *Traffic Identifier (TID)* di ciascun data frame, all'interno del campo QoS Control (si faccia riferimento all'immagine 1.2) utilizzato per esprimere eventuali vincoli richiesti dalla *Quality of Service (QoS)* del relativo MPDU. Perché sia possibile implementare i meccanismi di priorità descritti da EDCA vengono modificate alcune variabili che regolano l'accesso al canale: abbiamo visto come in CSMA/CA un trasmettitore passi parte del tempo ad attendere; scegliendo l'intervallo di backoff perché sia il più piccolo possibile o aumentando la durata del TXOP concesso per effettuare una trasmissione, ecco che ora diviene molto più semplice per un dispositivo portare a termine una trasmissione. Ovviamente, se tutti i dispositivi abusassero di questa riduzione delle attese in maniera indiscriminata, il rischio di una collisione andrebbe crescendo e verrebbe invece meno la possibilità di evitarle: è quindi richiesto uno sforzo condiviso perché ognuno possa portare a termine le trasmissioni.

³Il protocollo di comunicazione impiegato nelle LAN cablate.

⁴Il Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection è la DCF impiegata nelle LAN cablate.

⁵Categorie di accesso.

I parametri impiegati durante la fase di accesso al canale e scelti in funzione della categoria di accesso EDCA sono i seguenti:

- *Contention Window (CW)*: il tempo di backoff viene scelto tra i valori dell'intervallo $[CW_{min}, CW_{max}]$. Riducendo il valore di CWmax l'intervallo di backoff avrà probabilmente maggiore di essere più piccolo; aumentando il valore di CWmin si avrà l'effetto opposto.
- *Arbitration Inter-Frame Spacing (AIFS)*: si sostituisce al DIFS durante l'accesso al canale quando è richiesta una certa QoS. Le categorie di accesso a priorità maggiore hanno un AIFS ridotto, ma sempre tale che SIFS < AIFS.
- *Limits TXOP*: specifica il tempo massimo di trasmissione continua per un dispositivo. Un TXOP più lungo consente di completare la trasmissione senza dover attendere un nuovo turno di accesso.

In funzione di diversi fattori, tra cui la densità del BSS, un AP sceglie dei valori di default per dimensionare la CW: tali valori esprimono i limiti dell'intervallo di backoff e prendono il nome di aCW_{min} e aCW_{max} .

EDCA impone che i valori di CWmin, CWmax, AIFS e TXOP associati a ciascuna categoria di accesso siano quelli riportati in tabella 2.1.

Cat.	CWmin(ts)	CWmax(ts)	AIFS(ts)	TXOP(ms)
VO	$3 * \frac{aCW_{min} + 1}{4} - 1$	$7 * \frac{aCW_{max} + 1}{2} - 1$	2	2.080
VI	$7 * \frac{aCW_{min} + 1}{2} - 1$	$15 * aCW_{max}$	2	4.096
BE	$15 * aCW_{min}$	$1023 * aCW_{max}$	3	2.528
BK	$15 * aCW_{min}$	$1023 * aCW_{max}$	7	2.528
noQoS	$15 * aCW_{min}$	$1023 * aCW_{max}$	2	DIFS

Table 2.1: Valori EDCA in funzione della categoria. I valori di CWmin, CWmax ed AIFS sono riportati in *ts (time slot)*, unità di tempo che in WiFi7 assume il valore di $9\mu s$.

EDCA consente di gestire sì più categorie di traffico, ma non è sufficiente a soddisfare i requisiti imposti delle RTA che, data la loro varietà, possono essere molto stringenti. Vedremo più in là nella trattazione le soluzioni che WiFi7 ha individuato per affrontare il problema.

2.5 Multi-Link Operations

Un dispositivo in possesso di più interfacce fisiche e capace di supportare le *Multi-Link Operation (MLO)* viene definito *Multi-Link Device (MLD)*.

Per comprendere appieno il funzionamento delle MLO è importante capire la distinzione tra alcuni termini:

- Link: connessione logica tra due dispositivi, ognuno dei quali dotato di un'interfaccia. Due MLD possono stabilire più link tra di loro.
- Comunicazione: il flusso di dati tra due dispositivi che, in WiFi7, può avvenire anche su più link.

Essendo in grado di accedere al canale in maniera concorrente attraverso più interfacce, un MLD può operare in modalità singola, utilizzandone una sola come nelle precedenti generazioni, oppure in modalità multipla, sfruttandone due o più in maniera concorrente. La seconda delle due ammette

due ulteriori approcci: sincrono ed asincrono.

La modalità ad accesso asincrono prevede che ogni link venga utilizzato in maniera indipendente, senza effettuare alcun tipo di sincronizzazione tra di essi. Ognuno, di fatto autonomo, può essere impiegato in una comunicazione distinta. La modalità sincrona vede invece i diversi link come se fossero un solo canale virtuale, utilizzandoli all'unisono grazie a precisi schemi di temporizzazione. Un MLD può scegliere in maniera dinamica la modalità di accesso multiplo in base alle condizioni di rete e/o ai requisiti della comunicazione. La scelta dei canali da utilizzare può però essere vincolata: a causa di alcuni inconvenienti di natura fisica, sottocanali adiacenti possono disturbarsi reciprocamente. Per questo motivo, in modalità sincrona è ammesso sì l'utilizzo di canali vicini, ma viene richiesto che la temporizzazione tra le interfacce di comunicazione sia la più precisa possibile, mentre in asincrona risulta completamente impossibile l'utilizzo di canali adiacenti (resta possibile usare, ad esempio, due canali di cui uno attorno ai 2.4GHz e l'altro ai 5GHz).

2.5.1 Tipologie di MLO

Il tipo di dispositivo, il numero di interfacce utilizzate e la sincronizzazione tra queste ultime determinano il tipo di MLO adottata. La tabella 2.2 riporta tutte le possibili modalità disponibili in WiFi7. Rispetto alle tradizionali modalità di comunicazione, le MLO offrono notevoli vantaggi

MLD	Nome modalità	Comportamento
AP, STA	Simultaneous transmit and receive multi-link multi-radio (STR-MLMR)	Comunicazione simultanea indipendente su più link che non interferiscono tra loro
AP, STA	Nonsimultaneous transmit and receive multi-link multi-radio (NSTR-MLMR)	Trasmissione sincronizzata tra i diversi link. Trasmissione o ricezione coordinate tra i link
STA	Enhanced multi-link multi-radio (eMLMR)	Le radio disponibili vengono dinamicamente allocate a link diversi
STA	Multi-link single radio (MLSR)	Trasmissione o ricezione su un'interfaccia per volta
STA	Enhanced multi-link single radio (eMLSR)	Ascolto su più link, ma effettiva ricezione o trasmissione su uno alla volta

Table 2.2: MLD e relativi tipi di MLO disponibili.

in termini di efficienza e flessibilità: un esempio è il caso in cui il volume del traffico non sia costante su più link paralleli, dove un dispositivo può applicare delle tecniche di load balancing per evitare le congestioni distribuendo i messaggi su più link; inoltre, utilizzano più interfacce all'unisono, il throughput della comunicazione scala con il numero dei link attivi. Le applicazioni possono scegliere su quale banda trasmettere per sfruttare i vantaggi che ciascuna di esse ha da offrire: come già accennato, la banda 2.4GHz è quella che, per quanto affollata, garantisce una migliore propagazione del segnale e risulta quindi adatta alla trasmissione di frame di controllo; al contrario, una banda come quella 6GHz è la meno congestionata delle tre disponibili, dunque è adatta allo scambio dei dati veri e propri.

Non resta ora che vedere nel dettaglio il funzionamento di ciascuna modalità:

- STR-MLMR: funziona in maniera analoga all'accesso asincrono precedentemente descritto. Un AP può comunicare con delle STA attraverso più interfacce radio su altrettanti link in maniera del tutto indipendente, a patto che questi utilizzino canali su portanti diverse per evitare interferenze indesiderate.
- NSTR-MLMR: questa modalità implementa l'accesso sincrono prima introdotto. Perché la coordinazione tra link sia possibile, uno di essi viene eletto *link primario* per fare da

riferimento ai *link secondari*. Sua responsabilità è anche quella di venire utilizzato durante le procedure di connessione e di controllo e per permettere ai dispositivi *single-link* di vecchia generazione di connettersi al MLD.

- eMLMR: limitata alle sole STA, questa modalità funziona in maniera del tutto simile ad una STR-MLMR, ma consente di aggiornare in maniera dinamica l'assegnamento delle antenne disponibili ai link attivi. Quando per qualche motivo (load balancing, congestioni) una STA in modalità eMLMR intende dedicare una delle sue radio ad un link diverso, si coordina con l'AP remoto per effettuare lo scambio senza alterare le performance delle connessioni già intraprese.
- MLSR: una STA con una sola interfaccia radio può comunque stabilire più link con un AP MLD a patto che le utilizzi una per volta. L'assegnazione dell'interfaccia può avvenire in maniera del tutto dinamica e senza dover ristabilire la connessione. Prima di una trasmissione una STA MLSR monitora uno dei link, ascolta se sia libero e, se non lo è, può cambiarlo per cercarne uno che lo sia.
- eMLSR: estendendo il funzionamento della MLSR, questa modalità consente ad una STA di ascoltare più link contemporaneamente in modo da determinare più rapidamente quale sia il più adatto. Una STA eMLSR si può trovare in uno di due stati:
 - *Channel snooping*: prima di un UL, il dispositivo ascolta tutti i link alla ricerca di segnali in ingresso, dedicando un'antenna a ciascuno di essi. Trovato un link libero, la STA cambia stato. Per il DL, il dispositivo ascolta anche in questo caso tutti i link, ma passa ad uno stato di ricezione dei dati solo quando riconosce un frame in ingresso.
 - *Data transmission*: durante la trasmissione in UL, la STA utilizza l'unica antenna disponibile, perdendo temporaneamente la possibilità di ascoltare gli altri link, i quali vengono contrassegnati come inattivi. Terminata la trasmissione si ritorna al channel snooping.

2.5.2 Upper e lower MAC

L'introduzione delle MLO in WiFi7 ha richiesto una revisione della struttura del MAC layer. Nei dispositivi *single-band*, la comunicazione avveniva appunto su una sola banda avvalendosi di un'unica coppia MAC/PHY. Nei dispositivi *dual-band*, ogni banda operava indipendentemente, con una propria coppia MAC/PHY, ma senza possibilità di sfruttarle simultaneamente. In 802.11be architetture del genere non sono più sufficienti: non si parla più di utilizzare un'interfaccia sola, o quantomeno una sola per volta, ma di utilizzarne un certo numero in maniera concorrente. Perché sia possibile farlo, il MAC layer viene rivisto e suddiviso in due sotto-livelli:

- *Upper MAC*: anche detto *MAC comune*, come suggerisce il nome è la parte del layer condivisa tra le interfacce. Il suo scopo è quello di mascherare allo strato superiore, il network, i meccanismi delle MLO e di gestire aggregazione, frammentazione, numerazione ed riordinamento dei frame trasmessi e ricevuti, in parole più povere di coordinare le operazioni svolte sulle singole interfacce. Esiste un solo upper MAC per MLD.
- *Lower MAC*: ognuno di essi è associato ad una sua interfaccia. È responsabile della gestione dei singoli frame, che questi siano informativi o di controllo, associandovi gli indirizzi di sorgente e destinazione. Esistono più lower MAC per MLD, ma essi rispondono ad un solo upper MAC.

A supportare le MLO è di fatto solo l'upper MAC dato che a lui convergono i diversi link utilizzati nelle comunicazioni concorrenti. Ai diversi lower MAC invece giungono le informazioni scambiate su un singolo link, dunque potrebbero non essere a conoscenza della totalità delle informazioni di una connessione: nel caso i frame appartenenti ad uno stesso flusso di dati fossero distribuiti su più link, ad un lower MAC sarebbero visibili solo quelli scambiati sulla relativa interfaccia. L'unica eccezione si verifica nel caso in cui un AP MLD stia comunicando con una STA Non-MLD: in questo caso, essendo coinvolto un solo link, un solo lower MAC è sufficiente a gestire la totalità

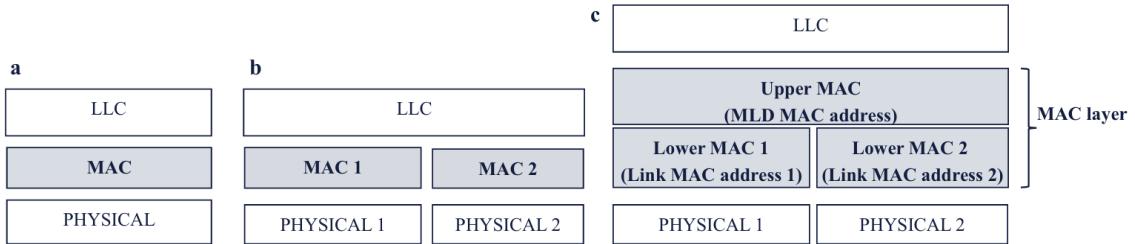


Figure 2.2: Dispositivo single-band (a), multi-band (b) e multi-link (c).

della comunicazione e può quindi assumere temporaneamente il ruolo dell'upper MAC, utilizzando il proprio indirizzo come riferimento in modo da garantire la retrocompatibilità con le vecchie versioni di WiFi.

In generale, sia l'upper MAC che i diversi lower MAC possiedono indirizzi diversi.

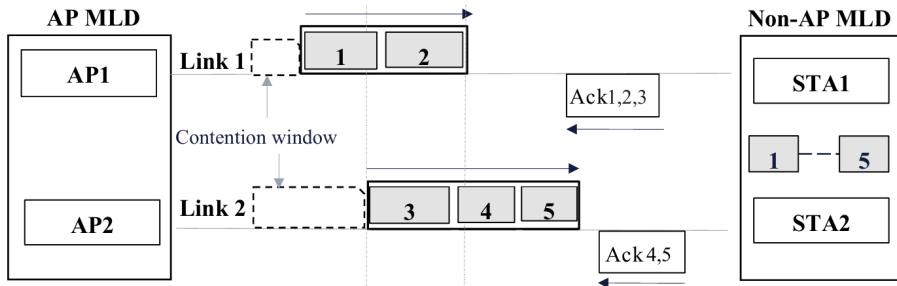


Figure 2.3: Una MLO asincrona. Notare come l'upper MAC di STA sia in grado di fare ACK sul frame 3 pur avendolo ricevuto su un link diverso.

2.5.3 Gestione della QoS

Le MLO diventano un potente strumento per la gestione della QoS di una comunicazione tra dispositivi grazie a tre aspetti fondamentali.

Link and Traffic Mapping: con le MLO viene introdotto un sistema di assegnazione dinamica dei flussi di traffico ai link disponibili. La negoziazione viene iniziata dall'AP che comunicando con le STA può associare uno o più TID ad una stessa interfaccia: una comunicazione VO, ad esempio, può essere gestita dai link con la latenza più bassa, data la natura time sensitive del suo traffico. Dopo la fase di associazione tra AP e STA tutti i TID vengono mappati su tutte le interfacce, ma l'AP può successivamente modificare tali assegnamenti attraverso una *TID-To-Link Mapping Negotiation*.

Quando un nuovo messaggio è prodotto dai layer superiori, il suo contenuto viene raccolto in frame ad una delle categorie EDCA; ognuna delle comunicazioni può poi essere effettuata secondo la configurazione. La negoziazione tra AP e STA può avvenire attraverso due modalità:

- *Link State Management:* la STA inizia le negoziazioni con un *Multi-Link Association Request* frame, proponendo all'AP una coppia TID-interfaccia a cui il destinatario risponderà con un frame *Multi-Link Association Response*, accettando o declinando l'offerta. Nel caso di rifiuto, la STA può riprovare con una nuova proposta (fig. 2.5).
- *Negoziazione via action frame:* le associazioni precedenti possono essere modificate dinamicamente attraverso action frame. Attraverso uno scambio di *Action Request* e *Action Response*, una STA e un AP possono concordare nuovamente sulle interfacce da utilizzare e per quali tipi di traffico (fig. 2.6).

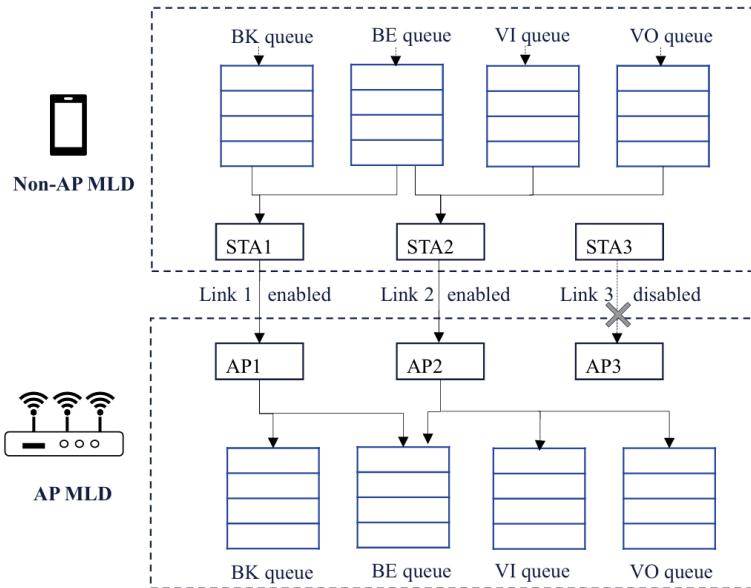


Figure 2.4: Un esempio di Link and Traffic Mapping in una comunicazione in UL. Le quattro code EDCA vengono mappate sulle due interfacce attive.

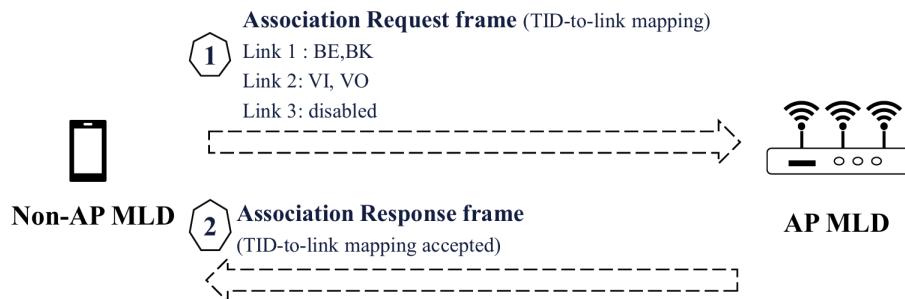


Figure 2.5: Negoziazione tramite Multi-Link Association Request/Response: l'AP assegna il traffico BE e BK all'interfaccia "1" di STA e quello VO e VI sulla "2". Il link "3" resta disabilitato.

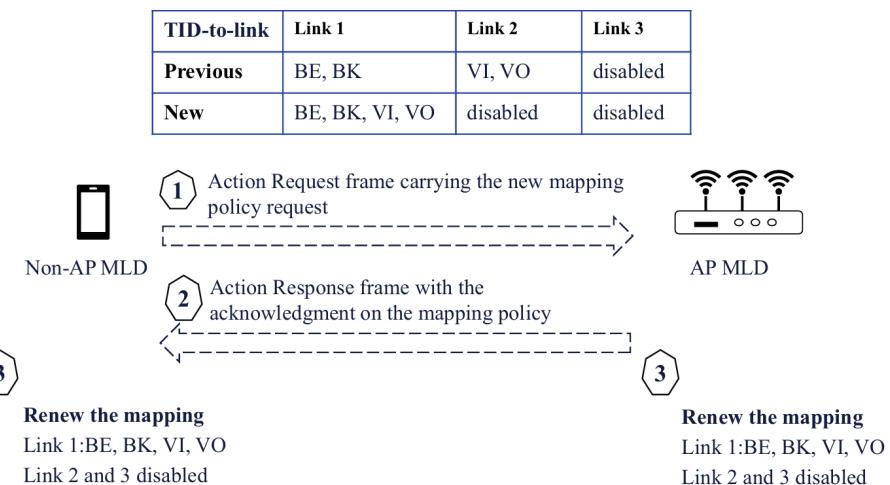


Figure 2.6: Negoziazione via action frame che riprende il caso dell'esempio precedente: ora anche VO e VI è sono associati all'interfaccia "1", mentre la "2" viene disabilitata.

Link State Management: un link di un MLD può essere abilitato o disabilitato in funzione di diversi fattori. Nel caso in cui il MLD entri in modalità power-save potrebbe decidere di tenere attivo un solo link, in modo da continuare a comunicare su uno solo di essi (le interfacce disabilitate consumano molto meno energia); quando è necessario uno scambio di dati a volume elevato o viene richiesta una comunicazione a latenza ridotta, abilitare tutti i link può tornare di grande aiuto. In ogni caso, attraverso il Link and Traffic Mapping visto in precedenza, un MLD può prima attivare una nuova interfaccia e poi impiegarla, o dismetterla prima di disabilitarla.

Buffering dei dati per MLD in power-save: un AP è in grado di bufferizzare i dati in DL destinati alle STA e trasmetterli in un secondo momento. L'AP comunica periodicamente lo stato dei messaggi bufferizzati utilizzando i *beacon frame* (vedere il paragrafo 2.6.2); quando una STA riconosce un suo messaggio in attesa allora attiva l'interfaccia associata al relativo tipo di traffico in modo da riceverlo nel prossimo futuro. In power-save solo il link principale può restare attivo, di fatto l'unico abilitato a ricevere i beacon frame.

2.5.4 MLO e casi d'uso

Modalità diverse di MLO possono essere compatibili tra loro: mentre un AP STR-MLMR può interagire con ogni possibile modalità lato STA, un AP NSTR-MLMR può farlo solo con una STA STR-MLMR.

Per identificare le modalità supportate, WiFi7 introduce un meccanismo di segnalazione in cui l'AP indica le modalità a sua disposizione nel *Basic Multi-Link Element* contenuto nei beacon frame, poi ultimato dalle STA durante la loro fase di associazione.

Vediamo ora le possibili combinazioni di MLO supportate.

AP STR-MLMR/STA STR-MLMR: questa coppia di dispositivi interagisce su due link indipendenti. Un'implementazione interessante è l'utilizzo di due link half-duplex con direzioni opposte, che permettono di simulare una comunicazione full-duplex tra i dispositivi.

AP STR-MLMR/STA NSTR-MLMR: l'AP è libero di accedere al canale in maniera indipendente su entrambi i link, ma trattandosi di una STA NSTR lo scambio di dati deve essere sincronizzato su di essi. Per farlo, l'AP resta in attesa attiva sul primo link con backoff giunto a zero in modo da aspettare i link rimanenti. Se i messaggi scambiati in parallelo hanno lunghezza differente il più corto viene esteso con dei bit di padding.

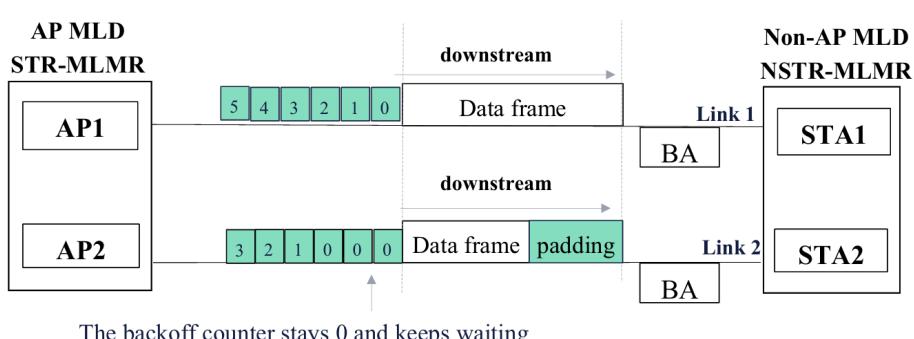


Figure 2.7: Comunicazione tra un AP STR-MLMR ed una STA NSTR-MLMR.

AP STR-MLMR/STA MLSR: la STA non può trasmettere su più link contemporaneamente, ma riesce ad adattarsi in maniera molto flessibile alle altre comunicazioni attive. Per comunicare all'AP quale sia l'interfaccia attiva, la STA aggiorna nei frame trasmessi l'indirizzo MAC sorgente, in modo che l'AP possa adattarsi ed aggiornare il destinatario dei frame in DL. I link inutilizzati possono andare in sleep mode per ridurre il consumo energetico.

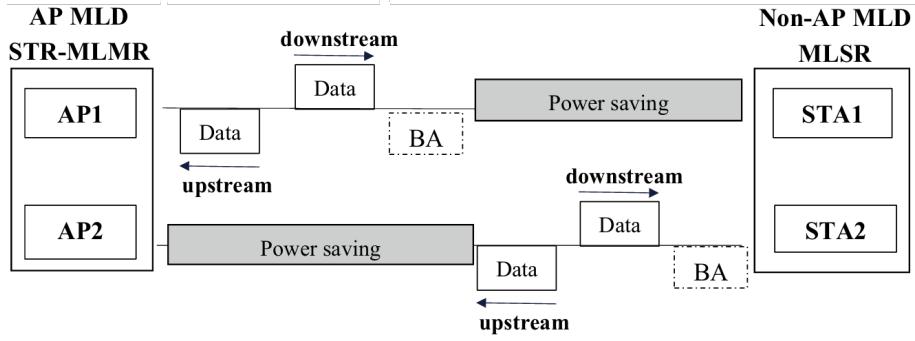


Figure 2.8: Comunicazione tra un AP STR-MLMR ed una STA STR-MLSR.

AP STR-MLMR/STA eMLSR: a differenza del caso precedente la STA può ora origliare su più link simultaneamente. In un primo momento (*Multi-Link Simultaneous Snooping State*) la STA dedica almeno un’antenna per link in modo da monitorare tutte le interfacce per ricevere eventuali frame di inizializzazione. Riconosciuta una connessione in ingresso, la STA passa ora in *Single-Link Data Interaction State* e dedica tutte le antenne alla trasmissione o ricezione dei frame sul singolo link. In questa seconda fase tutti i link rimanenti sono disattivati.

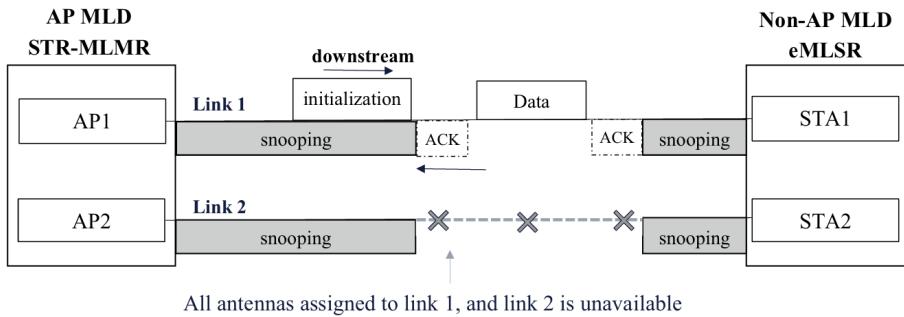


Figure 2.9: Comunicazione tra un AP STR-MLMR ed una STA eMLSR.

AP NSTR-MLMR/STA STR-MLMR: una combinazione molto comune nel caso in cui l’AP sia un hotspot mobile. Scelto dall’AP un link primario per la connessione iniziale, questo viene in seguito affiancato dai link secondari per la comunicazione parallela e coordinata. Se l’AP decide di usare un solo link durante il DL, la comunicazione può avvenire anche solo su quello principale.

2.6 Restricted Target Wake Time

2.6.1 QoS

Diversi tipi di traffico richiedono il rispetto di determinati vincoli in termini di latenza, throughput ed affidabilità. Argomento centrale nello sviluppo di WiFi7 è stata la volontà di supportare nel miglior modo possibile il funzionamento delle RTA e del loro traffico time sensitive, il cui nemico è per l’appunto il ritardo nella comunicazione.

All’incremento delle latenze contribuiscono il delay di propagazione del segnale, un fenomeno puramente fisico sul quale non si può agire, il ritardo nell’accesso al canale che inevitabilmente si presenta durante l’applicazione di CSMA/CA, ma soprattutto quello introdotto a causa dell’overhead degli algoritmi di scheduling delle trasmissioni. In WiFi, perché sia consentito l’accesso al canale, l’AP di rete deve permetterlo alle STA attraverso una TXOP e tecnologie come OFDMA e MU-MIMO permettono la concessione di più TXOP in maniera concorrente.

Per affrontare questi problemi, il TGbe ha introdotto diverse ottimizzazioni volte a ridurre il tempo

di accesso al canale e migliorare la gestione delle priorità dei flussi di traffico:

- Bande più larghe: l'allargamento della banda di trasmissione ad un massimo di 320MHz consente di scambiare un volume di dati più alto.
- OFDMA e MU-MIMO: permettono l'accesso concorrente al canale, dunque di soddisfare più dispositivi per volta.
- MLO: concedono la comunicazione parallela tra dispositivi, riducendo la probabilità di attesa e di congestioni.

Sul piano puramente algoritmico, il meccanismo precedentemente visto dell'EDCA viene esteso in WiFi7 con l'introduzione dello *Stream Classification Service (SCS)* già previsto dagli standard inclusi nel TSN. La sua implementazione è possibile includendo nei MPDU scambiati numerosi parametri relativi alla QoS raccolti all'interno di un *QoS Service Element*[3]. Quando una STA avvia una nuova comunicazione, invia all'AP un *SCS Request Action frame* perché venga a conoscenza dei requisiti del traffico. Parametri significativi del QoS Element contenuto al suo interno sono:

- Durata massima e minima del servizio.
- Throughput minimo da garantire.
- Delay massimo consentito.
- Il TID della categoria di accesso.

Il contenuto generale può essere consultato in fig 2.10. L'AP utilizza questi dati per assegnare

Octets :	1	1	1	4	4	4	3	3
	Element ID	Length	Element ID Extension	Control Info	Min Service Interval	Max Service Interval	Min Data Rate	Delay Bound
Octets :	0 or 2	0 or 4	0 or 1	0 or 3	0 or 4	0 or 2	0 or 1	0 or 1
	Max MSDU Size	Service Start Time	Service Start Time LinkID	Mean Data Rate	Burst Size	MSDU Lifetime	MSDU Delivery Ratio	Medium Time

Figure 2.10: Il contenuto di un QoS Element. I campi della seconda riga sono opzionali.

la STA a uno specifico gruppo di QoS e pianificare l'allocazione delle risorse di rete, riducendo il rischio di congestione.

2.6.2 TWT

I *beacon frame* sono stati introdotti in WiFi con l'obiettivo di implementare un meccanismo di power saving. Periodicamente, l'AP comunica in broadcast un beacon frame contenente informazioni di controllo per le STA, come il tempo mancante alla trasmissione del prossimo beacon e una lista di dispositivi per i quali l'AP sta bufferizzando dei messaggi. Questo consente alle STA di entrare in sleep mode per gran parte del tempo, riattivandosi solo per ricevere il nuovo beacon. Se una STA si trova nell'elenco delle destinatarie di un messaggio bufferizzato, resta attiva per riceverlo; in caso contrario, torna in modalità di risparmio energetico.

Questo meccanismo viene esteso con WiFi6 attraverso il *Target Wake Time (TWT)* in modo da migliorare l'accesso al canale. Con TWT, STA e AP possono negoziare degli intervalli di attività, detti *service periods (SP)* grazie alla trasmissione periodica dei beacon frame, nei quali entrambe le parti sanno che la comunicazione può avvenire senza necessità di contese o ulteriori verifiche.

Le scelte relative ai SP possono riguardare singole STA o loro insiemi detti *group*; nel secondo caso si parla di *Broadcast-TWT (b-TWT)*, una specializzazione del TWT che consente a più STA di prendere parte ai group (e quindi agli stessi SP) in maniera totalmente dinamica. Il TWT

migliora le prestazioni dei semplici beacon frame, non essendo più necessario per le STA svegliarsi all'arrivo di ognuno, ma solo durante i SP assegnati al proprio group.

L'ultima evoluzione della famiglia TWT è il *Restricted-TWT (r-TWT)*, pensato per garantire latenza prevedibile e migliorare la QoS. In una maniera simile a quella del suo predecessore, r-TWT suddivide ulteriormente i SP e dedica ciascun intervallo ad un determinato tipo di traffico. Riconoscendo i requisiti dal traffico grazie ai relativi parametri QoS, un AP diviene in grado di schedulare le diverse comunicazioni nei SP a disposizione, possibilmente concedendone con frequenza maggiore alle time sensitive. Le STA devono concludere le trasmissioni in corso prima dell'inizio di un nuovo SP, in modo da garantire che il canale venga liberato in tempo per il group successivo.

2.6.3 r-TWT e QoS: un caso d'uso

Perché siano meglio chiari i meccanismi descritti nei paragrafi precedenti viene mostrato un esempio di scheduling r-TWT nella fig 2.11. Lo schema mostra una comunicazione tra un AP e due STA, ognuna con diverse esigenze di traffico:

- STA1 trasmette traffico time sensitive e necessita di scambio dati sia in UL che in DL.
- STA2 interagisce con la rete in maniera meno urgente, magari richiedendo un servizio ad un web server, ed opera dunque con del traffico best effort puramente DL.

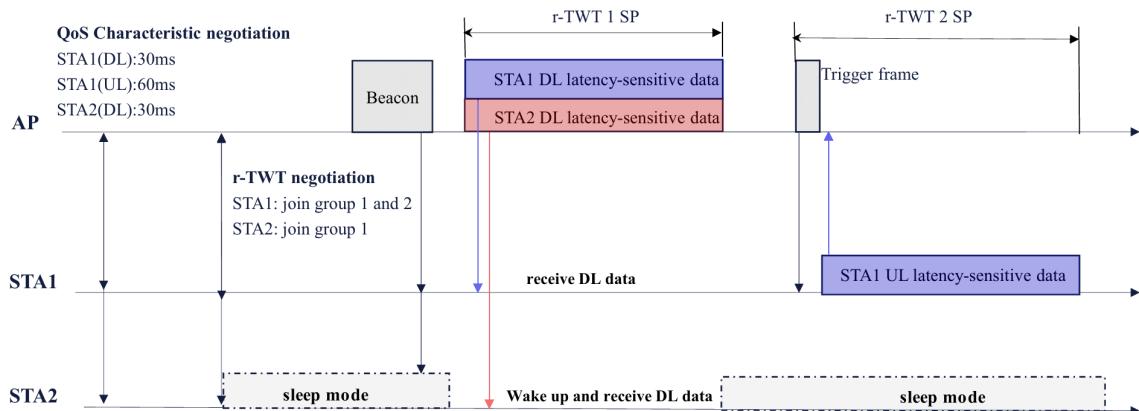


Figure 2.11: Un esempio di scheduling r-TWT secondo i criteri QoS.

Dopo una fase iniziale di negoziazione dei criteri di traffico, vengono configurati due SP per garantire una gestione efficiente del canale: SP1, a 30ms e dedicato al traffico DL di entrambi i dispositivi, e SP2, a 60ms ed utilizzato per il traffico UL di STA1.

L'AP assegna i dispositivi a due gruppi, ognuno dei quali associato ad un SP: group1 che comprende STA1 e STA2 e gestisce il traffico in DL, e group2 che include solo STA1 ed è riservato al traffico in UL.

Da notare, è la possibilità di effettuare trasmissioni parallele durante SP1 sfruttando tecnologie come OFDMA e MU-MIMO, le quali consentono all'AP di servire più dispositivi contemporaneamente, ed il fatto che STA2 può entrare in sleep mode al di fuori di SP1, risparmiando energia e riducendo il consumo della batteria.

2.7 La priorità EPCS

L'enorme diffusione delle reti WiFi offre l'opportunità di utilizzare l'*Emergency Preparedness Communication Service (EPCS)* per diffondere messaggi di emergenza al pubblico. Si tratta di una classe di traffico di natura imprevedibile, molto variabile e di altissima priorità e deve essere consegnato con bassa latenza anche in ambienti congestionati.

Per implementare un meccanismo del genere WiFi7 estende ulteriormente il funzionamento di EDCA: aggiornando i parametri delle diverse categorie di accesso diviene possibile alterare la probabilità con la quale il traffico possa essere consegnato con successo.

Pensiamo ad un caso d'uso: l'unità mobile dei pompieri giunge sul luogo di un incendio, si collega alla rete locale e il capo squadra dirige l'operazione attraverso voice-over-WiFi; l'emergenza diviene però un'occasione per congestionare la rete (si pensi al numero di persone che riprendono scene tragiche da cellulare e caricano i video online), ma il dispositivo di comunicazione del capo squadra supporta EPSCS, ha un accesso al canale facilitato e questo gli permette di portare a termine la missione.

L'invocazione e la revoca di questo tipo di priorità può essere iniziata da una STA o dall'AP. Nel primo caso:

1. L'AP locale comunica nei suoi beacon frame la disponibilità del servizio EPSCS.
2. La STA che intende invocare l'accesso prioritario (chiamiamola STAAP) si collega alla rete e comunica all'AP la sua intenzione tramite un *EPSCS Priority Access Request frame*.
3. L'AP ottiene i dati di STAAP e ne verifica l'autorizzazione, magari connettendosi ad un server governativo remoto⁶.
4. STAAP riceve in risposta un *EPSCS Priority Access Response frame* e, se autorizzato, può procedere con il suo accesso prioritario dopo aver aggiornato i suoi parametri EDCA.
5. Al termine dell'operazione, STAAP può portare la situazione alla normalità attraverso un *EPSCS Priority Access Teardown frame*.

Nel caso di inizializzazione da parte della rete:

1. L'AP riceve dall'esterno il comando di dare i permessi EPSCS a STAAP attraverso un *EPSCS Priority Access Enable Request frame*. Anche in questo caso l'AP controlla che STAAP sia autorizzato.
2. Se autorizzato, AP comunica a STAAP i nuovi parametri EDCA da utilizzare con un *EPSCS Priority Access Enable Response frame*.
3. Anche qui, al termine dell'operazione l'AP può portare la situazione alla normalità con un EPSCS Priority Access Teardown frame.

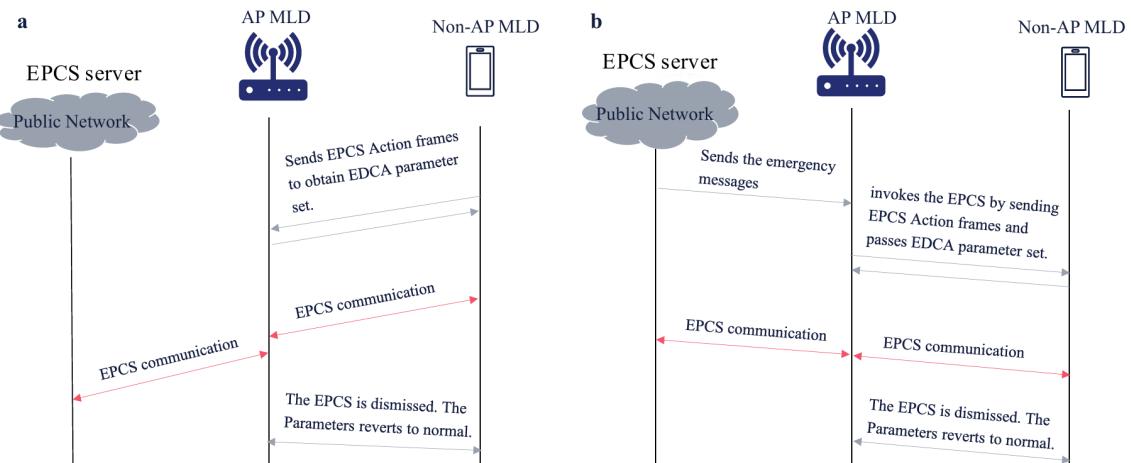


Figure 2.12: L'associazione inizializzata dalla STA (a) e dall'AP (b).

Perché la rete venga a conoscenza dei parametri EDCA per l'accesso prioritario possono essere utilizzati i valori predefiniti resi disponibili dal fornitore del servizio oppure quelli scelti dall'AP e distribuiti dinamicamente attraverso action frame.

⁶WiFi7 non standardizza come debba avvenire il processo di autorizzazione.

2.7.1 Controversie su EPCS

L'autenticazione dei dispositivi che si possono avvalere dell'accesso EPCS è stata questione di dibattito durante lo sviluppo di WiFi7. Negli istanti successivi all'autorizzazione il rischio di abuso della priorità ad accesso facilitato da parte dei dispositivi EPCS deve essere necessariamente preso in considerazione: se ad un'emergenza rispondessero 20 soccorritori, sarebbe corretto requisire le risorse di rete ai normali utenti? Prima di rispondere con un netto "*sì!*", bisognerebbe tenere conto del fatto che, con i nuovi parametri di accesso, ogni tipo di traffico prodotto da una STA EPCS, anche quello best effort, sarebbe classificato come di alta priorità. Per evitare un utilizzo scorretto della priorità da parte di dispositivi EPCS, WiFi7 prevede che il dispositivo attivi esplicitamente l'accesso prioritario solo quando necessario, in modo che il meccanismo di EPCS non resti sempre attivo per tutta la durata dell'autorizzazione, ma venga abilitato solo durante la trasmissione di dati classificati come critici.

Chapter 3

Risultati sperimentali

3.1 I vantaggi delle MLO

Questa sezione riporta i risultati ottenuti nello studio [5]. L'articolo a cui si fa riferimento esamina le modalità STR, eMLSR e SLO avvalendosi del simulatore *ns-3*. È bene notare che, mentre i valori in ordinata sono presentati con una scala lineare, i valori in ascissa sono proposti in scala logaritmica.

Il primo caso preso in considerazione è quello di una rete popolata da un AP e cinque STA con un payload di 1500 pacchetti; i link a disposizione di STR ed eMLSR sono due. Il risultato in fig 3.1 mostra come vari il throughput della rete in funzione del numero di frame scambiati al secondo (rapporto che nei grafici prende il nome di λ) in ognuna delle diverse modalità di MLO. Il grafico mostra come aumentando la frequenza di scambio dei messaggi, ad avere la meglio è

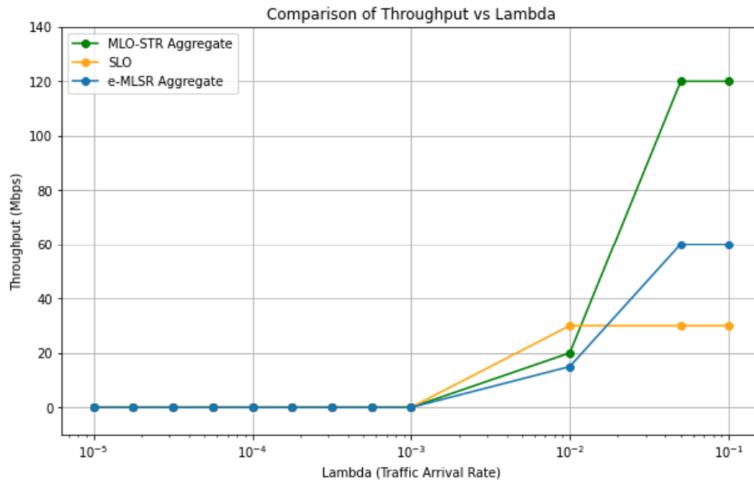


Figure 3.1: SLO, STR, eMLSR: throughput della rete in funzione del rapporto frame/s.

la STR; per un breve intervallo di valori anche SLO ha la meglio, ma viene presto soppiantata anche da eMLSR: una spiegazione a questo fenomeno risiede nel fatto che SLO è di molto limitata dal singolo link a disposizione, mentre eMLSR può effettuare load balancing tra quelli disponibili pur potendone utilizzare uno per volta. Importante è anche il valore di saturazione della comunicazione: mentre SLO raggiunge il throughput massimo in corrispondenza di $\lambda = 10^{-2}$, eMLSR e STR lo raggiungono quasi una decade dopo con valori rispettivamente due e quattro volte superiori.

Un caso più pratico riguarda però la convivenza tra le modalità MLO e SLO: ovviamente la diffusione dei dispositivi WiFi7 sarà graduale, dunque viene da chiedersi se le nuove MLO che si avvalgono di più link possano andare incontro a significativi cali di performance dovuti ai dispositivi non aggiornati. I due esperimenti successivi vanno ad analizzare proprio questa tematica.

Prima di tutto viene preso in considerazione il delay che precede la vera e propria trasmissione. La fig 3.2 mostra l'andamento di due tipi di delay in funzione del rapporto frame/s: il primo da sopra è quello di *accodamento*, ovvero il tempo che separa l'istante di ingresso di un frame nella coda di attesa di trasmissione e quello in cui lo stesso viene prelevato per tentare l'accesso al canale; il secondo è invece quello di *accesso*, il tempo necessario al trasmettitore per accedere al canale ed effettuare la vera e propria trasmissione. Le misure vengono effettuate su reti di dimensione diversa, considerando sempre un solo AP ed una sola STA STR ma un numero variabile di STA SLO, il cui valore può essere consultato nei due grafici. I risultati ottenuti mostrano, come prevedibile,

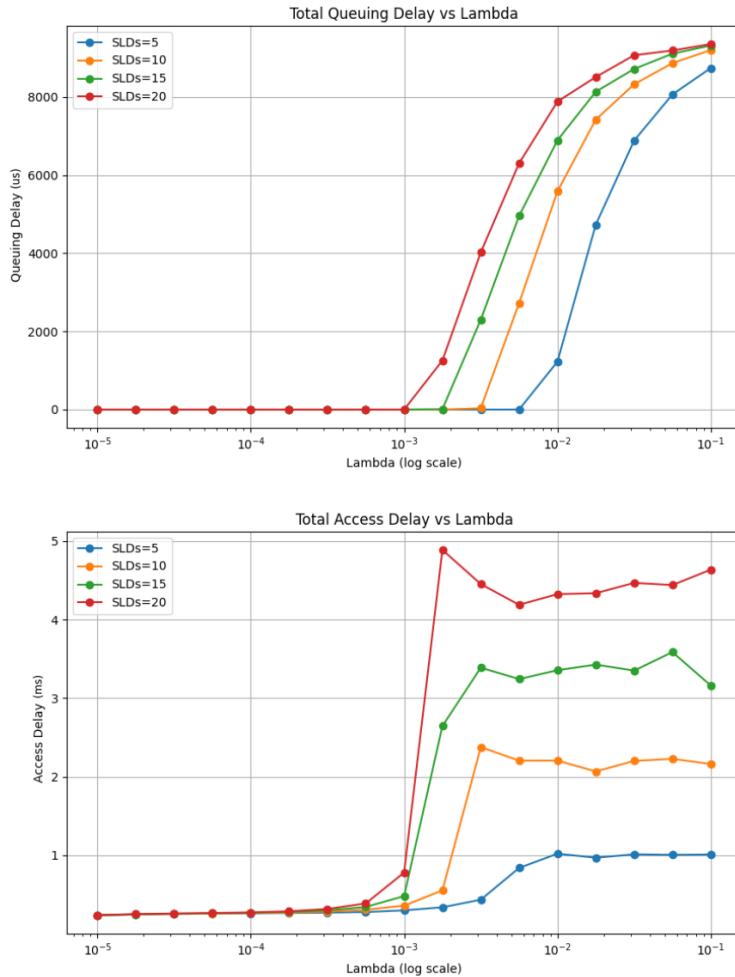


Figure 3.2: STR: delay di accodamento (sopra) e di accesso (sotto) in funzione del rapporto frame/s calcolati su reti di dimensione diversa.

che a reti di dimensione più piccola corrispondono delay di durata minore; questo esperimento è però non da comparare alle vere applicazioni di WiFi7: la simulazione non tiene infatti conto di metodi quali EDCA o SCS e considera quindi il traffico come se appartenesse alla stessa categoria di accesso. Tutto sommato, i risultati sono comunque più che accettabili (se tutti producessero del traffico VO, ad esempio, nel caso di 20 STA il ritardo massimo sarebbe comunque sotto i 15ms), ma sarebbero di gran lunga migliori nella realtà.

La fig 3.3 mostra invece l'andamento del throughput offerto da STR ed eMLSR in condizioni di interferenza simmetrica o asimmetrica¹ generata da un certo numero di STA sui due canali di

¹L'interferenza simmetrica riguarda in egual misura entrambi i link, l'asimmetrica incide maggiormente su uno dei sue.

comunicazione. I risultati mostrano come ancora una volta la modalità STR risulti di gran lunga più performante della eMLSR nel caso di una STA che genera interferenza asimmetrica.

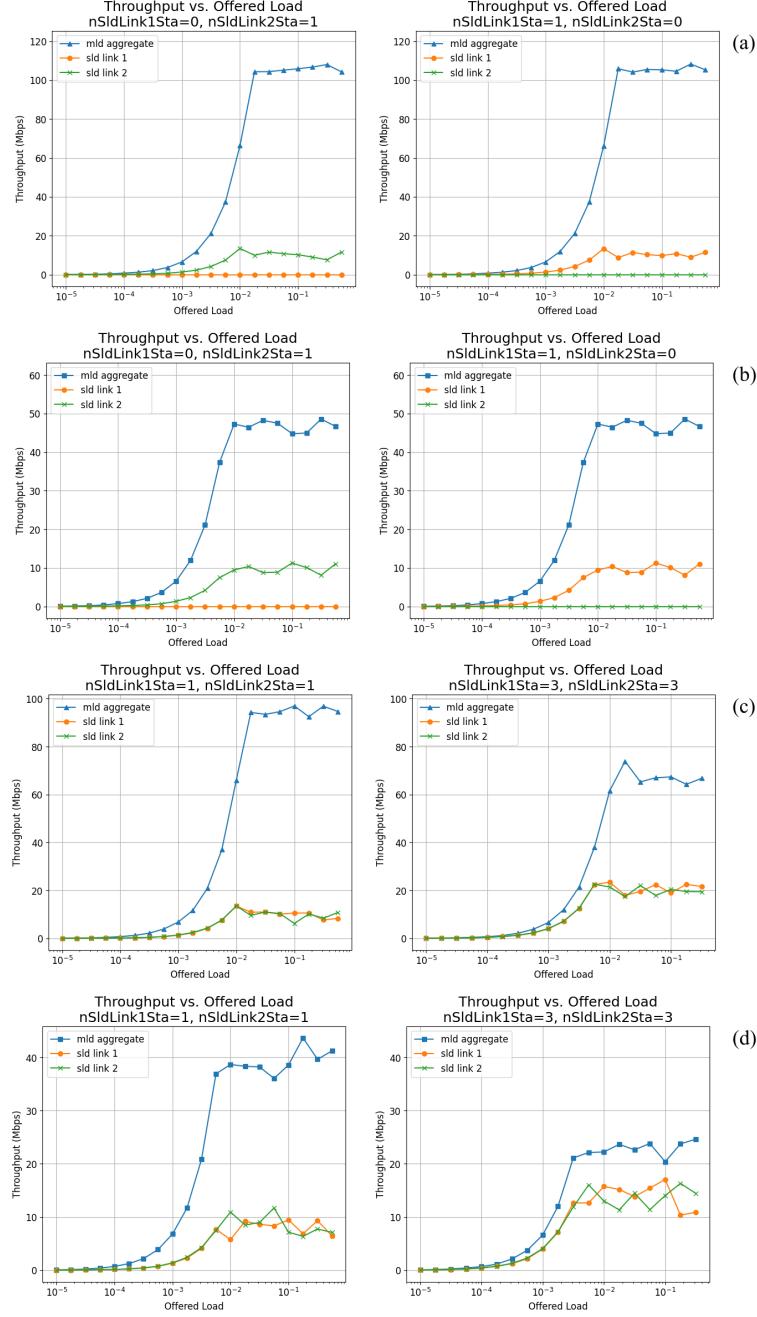


Figure 3.3: Intf. asimmetrica STR (a) ed eMLSR (b) e simmetrica STR (c) ed eMLSR (d).

3.2 Misurazioni sul campo

Selfnet è un’associazione no-profit studentesca portata avanti da soli volontari il cui scopo è quello di gestire una rete Internet che connetta i dormitori di Stuttgart, Ludwigsburg e Esslingen situati nei pressi di Stoccarda, Germania.

Allo scopo di promuovere la diffusione delle sconosciute in ambito informatico e telecomunicazionista, Selfnet è stato uno dei primi a fare uso di WiFi6, WiFi6E ed ora anche di WiFi7. All’epoca

della pubblicazione dello studio [4] a cui si fa riferimento, lo standard non era ancora stato ultimato (si parla di fine 2023), ma i primi modelli di AP 802.11be stavano già venendo rilasciati dai produttori con lo scopo di testarne il funzionamento; è in questo contesto che Huawei, nota società cinese leader nel settore della comunicazione e dell'informazione, ha munito Selfnet di un AP *AirEngine 8771-X1T* e di uno *Xiaomi 13 Pro*, di fatto il primo cellulare a supportare la comunicazione WiFi7 e che fungerà da STA durante gli esperimenti.

L'AP fornito, essendo all'epoca ancora un prototipo, non poteva essere utilizzato in maniera stand-alone: per questo motivo vi è stato affiancato un controller *AC6805* con software aggiornato. Nonostante ciò, i primi test sono risultati molto inconsistenti a causa del firmware beta dell'AP, dunque anche quest'ultimo è stato aggiornato ad una versione più stabile.

3.2.1 La configurazione di rete

Per effettuare i test, Selfnet ha messo a punto una LAN apposita in modo tale che l'AP possa comunicare via cavo con gli altri apparati di rete ed interagire in modo wireless solo con lo Xiaomi. In modo da connettere il tutto, viene utilizzato uno switch *S5732-H48UM4Y2CZ-V2* il cui ruolo è anche quello di alimentare l'AP attraverso il bus ethernet (*Power Over Ethernet*), metodo efficace per farlo funzionare a piena capacità.

L'*AirEngine 8771-X1T* possiede un totale di tre porte per lo scambio dei dati via cavo: una di queste è stata impiegata per alimentare l'AP, mentre una delle rimanenti è connessa direttamente al server grazie al quale sarà possibile effettuare i test di velocità.

La fig 3.4 mostra la configurazione di rete appena descritta.

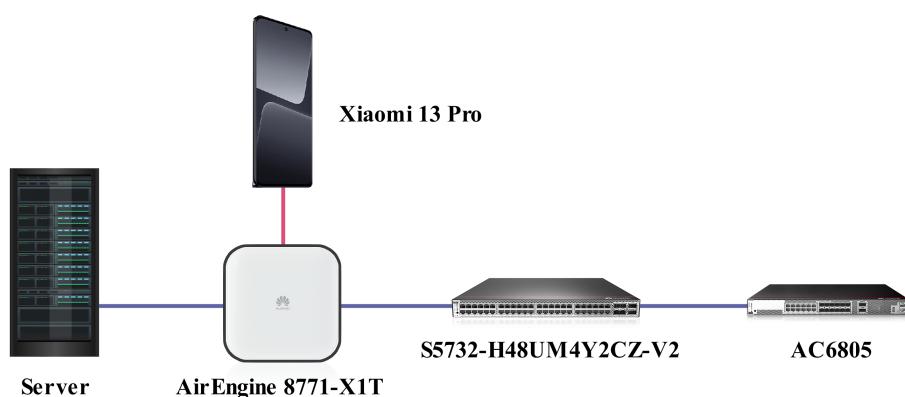


Figure 3.4: La configurazione di rete pensata da Selfnet. Tutti gli apparati di rete sono connessi via ethernet, meno che per l'AP e lo Xiaomi.

3.2.2 Setup delle misurazioni

Gli strumenti impiegati per calcolare le statistiche di comunicazione sono stati il software *iperf3* e *LibreSpeed*, un normale servizio di speedtesting del tutto open source utilizzabile online. Iperf3 è invece un tool scaricabile gratuitamente che consente di monitorare delle comunicazioni iniziate attraverso dei comandi da terminale tra un dispositivo *client* ed uno *server*.

Per condurre dei test di velocità con un alto volume di dati, il team di Selfnet ha deciso di impiegare come server un *Apple Mac Mini* provvisto di una porta ethernet da 10Gbps; per accertarsi che questa funzioni a dovere, due Mac Mini sono stati fatti comunicare utilizzando la stessa porta di ciascuno: sotto viene riportato il log iperf3 ottenuto sul dispositivo che ha ricevuto i dati in DL.

```

selfnet@mac-mini ~ % iperf3 -c 10.0.0.1
Connecting to host 10.0.0.1, port 5201
[ 5 ] local 10.0.0.2 port 49907 connected to 10.0.0.1 port 5201

[ ID] Interval          Transfer       Bitrate
[ 5]  0.00-1.00   sec  1.09 GBytes  9.38 Gbits/sec

```

```

[ 5] 1.00-2.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 2.00-3.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 3.00-4.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 4.00-5.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 5.00-6.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 6.00-7.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 7.00-8.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 8.00-9.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec
[ 5] 9.00-10.00 sec 1.10 GBytes 9.41 Gbits/sec

-----
[ ID] Interval Transfer Bitrate
[ 5] 0.00-10.00 sec 11.0 GBytes 9.41 Gbits/sec sender
[ 5] 0.00-10.00 sec 11.0 GBytes 9.41 Gbits/sec receiver

iperf Done

```

La stessa misurazione effettuata su LibreSpeed, oltre che confermare il risultato, indica che la velocità del traffico in UL raggiunge i 2442Mbps.

La configurazione dell'AP viene omessa², basti sapere che rispecchia i suggerimenti della documentazione ufficiale Huawei.

Ultimo dettaglio, ma non meno importante, è l'ambiente nel quale sono state effettuate le misurazioni: lo studio ci spiega come gli apparati di rete interessati fossero posizionati all'interno del seminterrato di uno dei dormitori, dove le spesse pareti della struttura avrebbero dovuto fare da scudo verso i segnali elettromagnetici esterni. Tuttavia, come potremo dedurre anche noi nelle vere e proprie misurazioni, il team di Selfnet sospetta possibili interferenze attorno alla frequenza 5GHz che avrebbero potuto manomettere in qualche misura i risultati finali.

3.2.3 Speedtest

Per analizzare le prestazioni di WiFi7 in più contesti, Selfnet effettua più speedtest posizionando AP e STA a distanze diverse.

Il primo dei test intende misurare le prestazioni massime della comunicazione. Sulla scia di quanto riportato dalla documentazione Huawei, perché le condizioni ottimali potessero essere raggiunte, la STA doveva essere posta a distanza ravvicinata dall'antenna 6GHz dell'AP, posta nella parte anteriore inferiore del dispositivo. Infine, anche la STA è stata collegata alla correntelettrica in modo da poter funzionare al massimo delle prestazioni.

Una volta aver implementato tutti i requisiti precedentemente menzionati, i risultati ottenuti superano di gran lunga quelli di WiFi6. A prova di ciò, sotto è riportato il log iperf3 della comunicazione tra Mac e Xiaomi.

```

selfnet@mac-mini Documents % iperf3 -c 10.0.0.1 -i 1 -R -t 60 -P 30
-p 5201
Connecting to host 10.0.0.1, port 5201
Reverse mode, remote host 10.0.0.1 is sending
.

.

.

[ ID] Interval Transfer Bitrate
[ 5] 0.00-1.01 sec 12.8 MBytes 106 Mbits/sec
[ 7] 0.00-1.01 sec 12.8 MBytes 106 Mbits/sec
[ 9] 0.00-1.01 sec 12.8 MBytes 106 Mbits/sec

```

²È comunque consultabile allo studio [4].

```

[ 11] 0.00-1.01    sec   12.8 MBytes   106 Mbits/sec
.
.
.
[SUM] 0.00-1.01    sec   382 MBytes   3.19 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 1.01-2.01    sec   424 MBytes   3.54 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 2.01-3.00    sec   379 MBytes   3.21 Gbits
.
.
.
[SUM] 3.00-4.01    sec   300 MBytes   2.50 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 4.01-5.06    sec   345 MBytes   2.76 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 5.06-6.00    sec   360 MBytes   3.20 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 6.00-7.01    sec   360 MBytes   3.00 Gbits/sec
.
.
.
[SUM] 7.01-8.01    sec   364 MBytes   3.06 Gbits/sec
.
.
.
-----[ ID] Interval          Transfer     Bitrate
[ 5] 0.00-60.01    sec   732 MBytes   102 Mbits/sec  sender
[ 5] 0.00-60.01    sec   719 MBytes   101 Mbits/sec  receiver
.
.
.
[ 63] 0.00-60.01    sec   719 MBytes   101 Mbits/sec  receiver
[SUM] 0.00-60.01    sec   21.4 GBytes   3.07 Gbits/sec  sender
[SUM] 0.00-60.01    sec   21.1 GBytes   3.02 Gbits/sec  receiver
.
.
.
iperf Done.

```

Il log mostra un test in modalità reverse³ su 30 flussi TCP paralleli per 60 secondi sulla porta 5201; lo Xiaomi fa da server e da sender, il Mac fa da client e da receiver. In traffico è unidirezionale e si misura una velocità di 3.07Gbps in uscita dal sender ed una di 3.02 Gbps in ingresso al receiver; questi valori non sono che la somma dei throughput rilevati su ciascuno dei flussi di comunicazione, ognuno dei quali mostra invece una velocità costante di circa 101/106Mbps. Infine, è possibile notare come il sender abbia inviato un totale di 21.4GB, mentre il receiver ne abbia riconosciuti solo 21.1GB: ciò è evidentemente dovuto ad una lieve perdita di pacchetti o ad imprecisioni nella misurazione.

Sebbene una tale configurazione non si adatti all'uso pratico (AP e STA sono a centimetri di distanza), i risultati di iperf3 mostrano una certa variazione nei diversi valori misurati, che rientrano in un intervallo accettabile per una connessione wireless, offrendo vantaggi significativi rispetto ai vecchi standard WiFi. Non sono state registrate velocità al di sotto di 2,5Gbps, con una media di oltre i 3, nonostante l'utilizzo di un firmware non ancora completamente maturo. Ulteriori test sono stati condotti anche tramite HTTP utilizzando LibreSpeed (fig 3.5) che, grazie alla sua

³È il server ad inviare dei dati al client.

interfaccia utente, rende immediatamente leggibili i risultati e consente di prendere visione del *ping* e del *jitter*⁴ della comunicazione, che in questo caso ammontano rispettivamente a 45 e 0.35ms.

Sempre grazie a LibreSpeed diviene possibile misurare velocemente la velocità del traffico in UL, che ammonta a 2613Mbps: si tratta di un dato più che interessante se si considera il fatto che è persino più alto di 200Mbps dello stesso valore misurato nella comunicazione tra i due Mac Mini (paragrafo 3.2.2).

Avendo LibreSpeed riconfermato i risultati di iperf3, i test successivi faranno uso del primo servizio soltanto.

LibreSpeed Speedtest

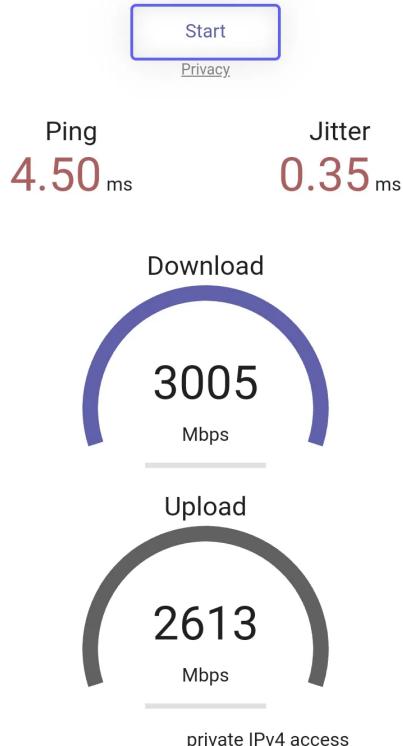


Figure 3.5: L’interfaccia LibreSpeed vista dallo Xiaomi 13 Pro ed i valori misurati nel caso “prestazioni massime”.

Lo scopo delle misurazioni successive è quello di paragonare le performance di Wifi6 e confrontarle con quelle di WiFi7 in scenari più realistici. Allo scopo di ottenere dei risultati il più coerenti possibile, è stato scelto come AP l’*AirEngine 8760-X1-PRO*, il modello 802.11ax direttamente precedente ad AirEngine 8771-X1T. I test sono poi stati effettuati in modo sequenziale, così da evitare interferenze tra i due AP sulla banda 5GHz.

Il primo degli scenari presi in considerazione vede AP e STA ad una distanza di 2m l’uno dall’altro. I risultati sono riportati in nella tabella 3.1. Come possibile vedere, WiFi7 offre una ve-

Vers.	DL(Mbps)	UL(Mbps)	Ping(ms)	Jitter(ms)
WiFi7	2042	1874	4.2	1.08
WiFi6	1155	1129	3.7	1.08

Table 3.1: Misurazioni a distanza di 2 metri.

⁴Il ping è un indice di latenza che rappresenta il tempo di andata e ritorno dei messaggi (dal client al server ed indietro); il jitter rappresenta la variazione del ping nel tempo. Una connessione stabile e veloce porta entrambi questi valori al minimo.

locità in DL ed una in UL superiori rispettivamente del 77% e del 66% alle corrispondenti misurate in WiFi6; nonostante il ping sia invece più alto nel primo caso, questo dato può essere trascurato in quanto potrebbe dipendere da fattori ambientali o dalla configurazione del test piuttosto che da un limite della tecnologia.

Il secondo degli scenari considera AP e STA ad una distanza di 10m l'uno dall'altro. In tabella 3.2 sono visibili i risultati. L'aumento della distanza ha un importante impatto sulle performance

Vers.	DL(Mbps)	UL(Mbps)	Ping(ms)	Jitter(ms)
WiFi7	1238	1293	4.3	112
WiFi6	524	662	3.4	1.35

Table 3.2: Misurazioni a distanza di 10 metri.

di WiFi7, che vede un calo del 39% e del 31% sulle velocità in DL ed UL ottenute nel caso precedente; in ogni caso, si tratta di valori accettabili se si considera il calo delle prestazioni in WiFi6 (-55% e -41%, rispettivamente). A 10 metri, WiFi7 è ancora significativamente più veloce di WiFi6, con un +136% in DL e +95% in UL. Dato non trascurabile in questo caso è invece il jitter, che aumenta drasticamente a 112ms, segnalando una maggiore instabilità nella connessione WiFi7 a questa distanza.

L'ultimo scenario vede i due dispositivi ad una distanza di 3m l'uno dall'altro, ma prevede che una porta metallica venga frapposta tra i due in modo da testare le performance i presenza di ostacoli. La tabella 3.3 riporta i risultati. L'ostacolo che si frappone tra AP e STA degrada di

Vers.	DL(Mbps)	UL(Mbps)	Ping(ms)	Jitter(ms)
WiFi7	517	418	4.4	1.28
WiFi6	288	701	3.9	2.25

Table 3.3: Misurazioni a distanza di 3 metri con un ostacolo.

molto le performance di entrambe le versioni: anche se la distanza che li separa è minore rispetto al caso precedente, l'impatto sulle prestazioni è enorme: rispetto al test effettuato a 2m di distanza, WiFi7 vede un calo del 75% e del 78% delle velocità in DL ed UL, mentre ping e jitter rimangono presochè stabili (4.4ms e 1.28ms), indicando che il segnale perde molta potenza, ma resta utilizzabile. WiFi6 risponde in modo diverso: mentre si riscontra un impatto simile sulle performance in DL, in UL si misura sorprendentemente un miglioramento rispetto al test a 10m. In ogni caso, WiFi7 ha ancora un vantaggio in DL (+79%) rispetto a WiFi6, ma viene battuto in UL (-67% rispetto a WiFi6). A conti fatti, bisogna riconoscere che WiFi7 perde drasticamente efficienza in presenza di ostacoli, segno che il suo utilizzo ottimale è in ambienti a spazio libero.

In conclusione, si può affermare che WiFi7 offre delle capacità impressionanti in termini di performance, soprattutto se si considera il fatto che a distanze anche superiori ai 10m è stato superato il Gbps in DL. È importante però notare che per ottenere tale larghezza di banda, un AP WiFi7 dovrebbe essere posizionato in linea visiva diretta con le STA; in scenari con ostacoli grandi tra i dispositivi, le differenze tra le due versioni non sono così evidenti.

Chapter 4

Confronti con altre tecnologie

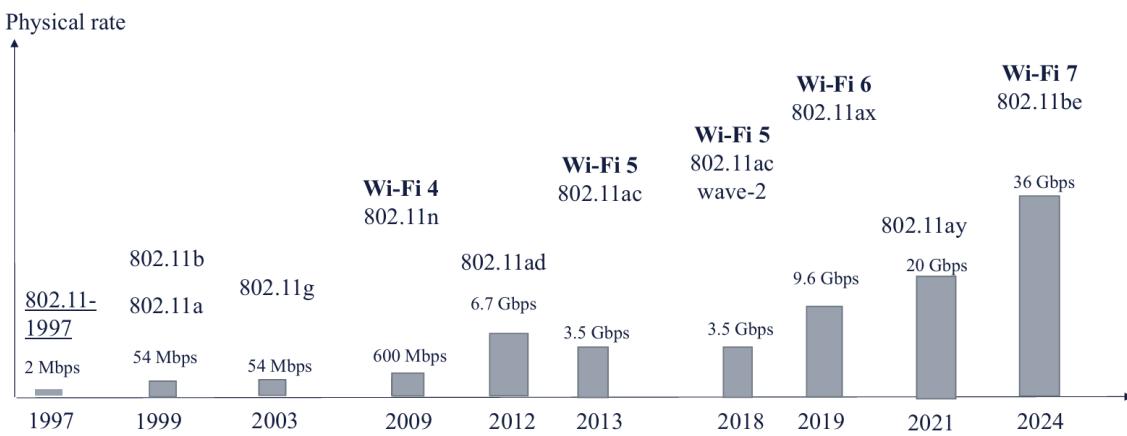


Figure 4.1: L’evoluzione in termini di throughput delle versioni di WiFi.

Ad inizio elaborato ci siamo soffermati sull’evoluzione della tecnologia WiFi e delle funzionalità che ciascuna versione ha mostrato al mercato:

- WiFi4: ha introdotto il supporto per frequenze a 2,4 e 5GHz, con una latenza stimata tra i 10 e i 50ms. Sebbene fosse un miglioramento rispetto alle versioni precedenti, la sua affidabilità era modesta, con possibilità di interferenze, specialmente in ambienti congestionati. Le prestazioni erano limitate.
- WiFi5: ha ridotto la latenza ed aumentato l'affidabilità significativamente; maggiore efficienza nel gestire più dispositivi simultaneamente ma perdita di performance in ambienti densamente popolati, come grandi spazi o edifici.
- WiFi6: ha portato miglioramenti notevoli in termini di latenza, riducendola ulteriormente a un intervallo compreso tra 1 e 10ms. La connessione diviene più stabile e veloce, in particolare in ambienti con molteplici dispositivi connessi. La gestione del traffico è stata ottimizzata grazie a tecnologie come OFDMA, che consente di migliorare le prestazioni in scenari di congestione.
- WiFi6E: versione avanzata di WiFi6 che sfrutta la portante 6GHz, la quale offre maggiore larghezza di banda e meno interferenze. La latenza scende sotto ad 1ms, il che consente esperienze ancora più fluide in applicazioni time sensitive, come il gaming o lo streaming in alta definizione. Le prestazioni possono variare in base alle condizioni locali, inclusa la presenza di ostacoli fisici o altre fonti di interferenza.
- WiFi7: porta la latenza a valori inferiori a 1ms, facendo un ulteriore salto nella velocità di connessione. È previsto un livello di affidabilità superiore al 99,99% grazie all’uso di tecnologie come le MLO, che consentono di sfruttare contemporaneamente più bande di frequenza

per garantire una connessione continua e stabile. WiFi7 rappresenta una grande promessa, soprattutto per applicazioni avanzate come realtà aumentata, virtuale e connessioni a bassa latenza per dispositivi industriali o robotici.

WiFi non è però l'unica tecnologia wireless oggi in commercio. Come si pone in confronto alle altre?

Versione	Latenza stimata	Affidabilità
WiFi4	10-50ms	Modesta, con possibili interferenze
WiFi5	5-30ms	Migliorata rispetto a WiFi4
WiFi6	1-10ms	Più stabile in ambienti affollati
WiFi6E	< 1ms	Dipende dalle condizioni locali
WiFi7	< 1ms	Affidabilità prevista > 99.99%

Table 4.1: Caratteristiche delle diverse versioni di WiFi.

4.1 Altre tecnologie

Tech.	Latenza minima	Affidabilità	Use cases
5G URLLC	< 1ms	99.999%	Applicazioni di importanza critica
WiFi6/6E	1-10ms	99.99%	Connessioni wireless in generale per ambienti ad alta densità
WiFi7	< 1ms	> 99.99%	Reti avanzate per case/uffici, applicazioni a bassa latenza
LiFi	< 1ms	> 99.999%	Ambienti sensibili alle interferenze o ad alta sicurezza
TSCH	10-20ms	99.999%	IoT industriale, reti di sensori, IoT ultra affidabile

Table 4.2: Caratteristiche delle diverse tecnologie sul mercato.

4.1.1 5G URLLC

Con l'evoluzione delle tecnologie di comunicazione, 5G e WiFi7 rappresentano i due principali pilastri per le reti wireless del futuro, offrendo prestazioni elevate, ridotta latenza e alta affidabilità, ma distinguendosi per casi di utilizzo e infrastruttura. Il *5G Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC)* è probabilmente la tecnologia che meglio si relaziona a WiFi: il primo eccelle nelle comunicazioni su larga scala, con velocità fino a 10Gbps e latenze inferiori al millisecondo, risultando ideale per applicazioni industriali, veicoli autonomi e smart cities. Il 5G soffre tuttavia negli ambienti chiusi, dove gli ostacoli fisici attenuano il segnale, mentre WiFi7, grazie alla tecnologia MIMO, ottimizza la trasmissione focalizzando il segnale verso le STA in ascolto.

Dal punto di vista del livello MAC, il 5G sfrutta tecniche avanzate per schedulare le comunicazioni, come il *Grant-Free Access*¹ e il *network slicing*², permettendo la gestione concorrente di più categorie di traffico con requisiti QoS differenti. Il Massive MIMO implementato in questa

¹Permette ai dispositivi di trasmettere dati senza dover richiedere preventivamente l'accesso al canale.

²Permette di dividere una singola infrastruttura di rete in più reti virtuali, ognuna ottimizzata per specifiche applicazioni o servizi.

tecnologia consente al 5G di migliorare la copertura e la capacità di rete, rendendolo ideale per scenari con alta mobilità, come la guida autonoma e la comunicazione tra dispositivi IoT in contesti industriali (si parla di *Industry 4.0*).

Aziende e fornitori di servizi stanno sviluppando soluzioni ibride che combinano WiFi7 e 5G per garantire connettività senza interruzioni durante il salto tra le due tecnologie, impiegandole rispettivamente negli ambienti interni ed esterni. Un esempio può essere il loro impiego all'interno delle *smart factories*, dove WiFi7 può gestire localmente robot e macchinari, mentre il 5G può assicurare la trasmissione di dati verso il la rete e il coordinamento tra diversi stabilimenti produttivi.

In alcuni settori, le due tecnologie possono entrare in competizione, come nei servizi cloud, dove il 5G offre accesso rapido alla rete ed alta mobilità. WiFi7 rimane però la scelta ottimale per applicazioni che richiedono throughput elevati in contesti a bassa mobilità, come il cloud gaming, la realtà aumentata e la connettività domestica avanzata, come nello streaming video sulle smart TV, ad esempio.

Più che competere, 5G e WiFi7 tendono a completarsi a seconda delle esigenze. Nel futuro vedremo probabilmente una collaborazione sempre più stretta tra le due tecnologie, garantendo prestazioni ottimali in ogni scenario, dall'automazione industriale alle reti domestiche.

4.1.2 LiFi

Con *LiFi* si intende una particolare tecnologia di comunicazione wireless messa a punto dallo standard 802.11bb che si avvale della luce³, anziché delle onde elettromagnetiche, come mezzo di comunicazione. Questa sostanziale differenza permette a LiFi di comunicare senza interferenze da parte di segnali elettromagnetici e con una velocità teorica che supera quella di WiFi stesso. Si tratta in ogni caso di una tecnologia emergente e dunque non molto diffusa.

Oltre che le differenze nella natura dei segnali trasmessi, LiFi differisce da WiFi per diversi motivi:

- **Velocità:** alcune stime propongono velocità anche superiori ai 100Gbps.
- **Affidabilità:** molto alta data la scarsità dei fenomeni di collisione.
- **Sicurezza:** la luce infrarosso non attraversa le pareti, il che rende difficile per un malintenzionato origliare i messaggi.
- **Copertura:** per lo stesso motivo è più ridotta di WiFi, problema facilmente risolto installando più antenne per WLAN; ad esempio, per connettere una casa sarebbe sufficiente installarne una per stanza.

Sotto un primo punto di vista si può dire che LiFi ha la meglio negli ambienti affollati e/o sensibili alle interferenze, magari stanze ospedaliere o anche mezzi trasporta-persone (i passeggeri di un aereo sono oggi pregiati di attivare la *modalità aereo* sui loro dispositivi). Guardando invece al futuro, una possibile standardizzazione di un protocollo di comunicazione ibrido potrebbe fare uso di WiFi come rete generale e LiFi per il vero e proprio scambio di dati perché sia più veloce e sicuro.

4.1.3 TSCH

Standardizzato da 802.15.4, il *Time Slotted Channel Hopping* propone una soluzione per le comunicazioni wireless ad alta affidabilità e bassa velocità non soggette a vincoli di delay. Già dal primo impatto si può notare come queste caratteristiche siano tutt'altro che simili a quelle di WiFi evidenziando come in effetti le due tecnologie non siano affatto in competizione.

Data la bassa richiesta di potenza, TSCH è impiegato principalmente nell'IoT, specialmente in quello industriale, poiché consente una comunicazione affidabile per i dispositivi a basso consumo energetico. La sua alta affidabilità e resistenza alle interferenze è implementata grazie alla tecnica del *channel hopping* che consente ai dispositivi di cambiare dinamicamente la frequenza di comunicazione senza interruzione. Tuttavia, la velocità di scambio delle informazioni è molto inferiore

³Onde vicine all'infrarosso con lunghezza d'onda compresa tra gli 800 e i 1000nm.

(si parla di kbps-Mbps) rispetto al WiFi.

Nonostante le loro differenze, WiFi e TSCH possono complementarsi in diversi scenari:

- *Industria 4.0*⁴: WiFi fornisce connessione ad alta velocità per terminali di controllo e monitoraggio degli impianti, mentre TSCH connette sensori e attuatori "meno intelligenti" e con consumi ridotti.
- Domotica: termostati, sensori di sicurezza e luci intelligenti possono utilizzare TSCH per ridurre il consumo energetico, mentre il WiFi può limitarsi alle applicazioni che interagiscono direttamente con l'utente.
- Ambienti urbani: TSCH garantisce una rete affidabile per il monitoraggio remoto di infrastrutture, mentre il WiFi fornisce connettività agli operatori e ai sistemi di gestione.

WiFi e TSCH risultano complementari. In particolare WiFi offre prestazioni elevate in termini di velocità e latenza, mentre TSCH garantisce affidabilità e risparmio energetico. Il futuro vedrà probabilmente un'integrazione crescente tra le due tecnologie.

⁴Con questo termine si fa riferimento alla rivoluzione digitale dell'industria, in un certo senso la quarta rivoluzione industriale.

Chapter 5

Conclusioni

L'evoluzione delle reti WiFi ha seguito un percorso di costante innovazione, rispondendo alle crescenti esigenze di connettività, affidabilità e velocità richieste dalle moderne applicazioni digitali. Con l'introduzione di WiFi7, si assiste a un significativo salto tecnologico, volto a migliorare non solo le prestazioni in termini di throughput e latenza, ma anche l'efficienza nella gestione delle risorse di rete e la scalabilità delle infrastrutture WLAN.

L'analisi condotta ha evidenziato come le principali innovazioni di WiFi7, tra cui le Multi-Link Operations, l'Enhanced Distributed Channel Access e il Restricted Target Wake Time, abbiano il potenziale di rivoluzionare il modo in cui le reti WiFi vengono utilizzate. Grazie alle MLO, i dispositivi possono sfruttare più bande di frequenza contemporaneamente, migliorando la stabilità delle connessioni e ottimizzando l'uso dello spettro disponibile; la combinazione tra il meccanismo EDCA e la nuova gestione della Quality of Service del traffico, consente una migliore gestione delle priorità, assicurando che applicazioni time sensitive, come il gaming online, la realtà virtuale e le videoconferenze, possano operare senza interruzioni anche sotto congestioni. I risultati sperimentali dimostrano che WiFi7 offre un incremento sostanziale delle prestazioni rispetto ai suoi predecessori, soprattutto in scenari con un'elevata densità di dispositivi grazie anche, tra le altre cose, al nuovo EHT PHY.

Un altro argomento importante è stato il confronto tra WiFi7 e le altre tecnologie wireless, come 5G, TSCH e LiFi. Sebbene 5G offra vantaggi in termini di copertura e mobilità, WiFi7 risulta più adatto per le reti wireless da interno, soprattutto in ambienti domestici dato anche il costo ridotto dell'infrastruttura di rete; LiFi, pur offrendo vantaggi in termini di sicurezza e velocità di trasmissione, presenta limitazioni dovute al ridotto raggio della tecnologia; TSCH, utilizzato principalmente in ambienti industriali, non riesce a garantire la stessa velocità di WiFi7, ma essendo impiegato in particolari contesti dove il volume di dati da scambiare non risulta molto elevato non è detto che le due tecnologie possano entrare in competizione.

L'adozione su larga scala di WiFi7 dipenderà da fattori come l'aggiornamento delle infrastrutture di rete, ma la sua retrocompatibilità con gli standard precedenti favorirà sicuramente la transizione verso questa nuova generazione. In ogni caso, sarà il tempo a parlare e a dare un giudizio riguardo l'utilità e l'efficienza della tecnologia.

In conclusione, WiFi7 rappresenta un passo decisivo nell'evoluzione delle reti wireless. Il suo successo dipenderà dalla capacità di soddisfare le esigenze emergenti in un mercato in continua evoluzione, in cui l'integrazione tra diverse tecnologie sarà sempre più importante.

Bibliografia

- [1] Cheng G., *Wi-Fi 7: Principles, Technology, and Applications.* (Springer Nature)
- [2] Jerome Henry, Brian Hart, Binita Gupta, Malcolm Smith, *Wi-Fi 7 In Depth: Your Guide to Mastering Wi-Fi 7, the 802.11be Protocol, and Their Deployment*, Addison-Wesley Professional, 2025.
- [3] The QoS Characteristics Element: Resolution for LB266 CIDs related to 9.4.2.316 QoS Characteristics element Part 2 (p2p related issues)
- [4] Selfnet (2023, 18 ottobre). WiFi 7 – Evaluation. Recuperato l'11/02/25 da https://blog.selfnet.de/2023-10-18_wifi7_evaluation.html
- [5] Aishwarya Choorakuzhiyil, Kevin Ho, Sara Reyes, *Comparison of STR and EMLSR Performance in Wi-Fi 7 MLO*, arXiv, 2025.

Chapter 6

Epilogo

Avrei voluto scrivere un sacco di cose, dopo averle annotate per anni sugli appunti del cellulare. Sono banali e le ignorerò tutte.

È dal duemila venti che la mia vita è cambiata, e se da aprile non riesco a rispondere ad un telefono, della sera del quattro novembre mi ricordo quando prendevo in giro mamma, perché aveva detto che il giorno dopo conveniva salire a Pisa, che la casa là era già libera e che tanto la Calabria sarebbe andata in zona rossa.

In quattro anni ho imparato a memoria la forma dei miei denti per quante volte li ho sognati cadere. Perché deve essere così? Perché lottare ogni sera con la testa, come sotto assedio dentro le coperte?

Ho passato quattro anni a scavare in un angolo per cercare dello spazio per crescere ancora, a deludere ogni aspettativa, a recitare insulti a trenta centimetri da uno specchio, a sperare che il telefono giù a casa non suoni a mezzanotte.

Grazie a Mamma e Papà, a mia Sorella e a mio Fratello. Grazie a tutti i miei zii, le mie zie ed ai cugini, con i quali ho perso anche troppo tempo. Grazie a chi ha condiviso casa con me, grazie a chi conosco da tempo ed è rimasto dopo il liceo, a chi ho conosciuto all'università ed in via Diotisalvi¹, alla fam.Russo, agli altri ragazzi di Cervaro, a chi ho conosciuto per caso dietro uno schermo, a chi ha riso con me.

¹Ad oggi, non siamo di fatto ancora stati salvati.



Find your grandparents or someone of age
Pay some respects for the path that they paved
To life they were dedicated
Now, that should be celebrated.

Ai miei nonni, grazie.