

***Evoluzione dello
standard IEEE 802.11
(WiFi): verso IEEE
802.11ac***



INDICE

Indice.....	3
Indice delle Figure.....	5
Indice delle Tabelle	5
Introduzione	6
1. IEEE 802.11.....	7
1.1 PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)	8
1.2 PMD (Physical Medium Dependent).....	8
1.3 MAC (Medium Access Control).....	8
1.4 DCF (Distributed Coordination Function)	9
1.5 PCF (Point Coordination Function).....	10
2. IEEE 802.11g	11
2.1 FHSS	13
2.2 DSSS	13
2.3 Livello PHY: “4 strati fisici differenti”	15
2.4 Supporto obbligatorio per il preambolo corto	16
2.4.1 IEEE 802.11g con preambolo lungo	16
2.4.2 IEEE 802.11g con preambolo corto	17
2.4.3 IEEE 802.11g ERP-OFDM	17
2.4.4 IEEE 802.11g DSSS-OFDM.....	18
2.5 Meccanismi di protezione per l’interoperabilità	19
2.5.1 Modulazione DSSS-OFDM	20
2.5.2 RTS/CTS in DSSS	20
2.5.3 CTS-to-SELF	20
3. IEEE 802.11n.....	22
3.1 Miglioramenti del livello PHY	22
3.1.1 Tecnica MIMO	22
3.1.1.1 STBC and MRC.....	24
3.1.1.2 SDM	24
3.1.1.3 TxBF	25
3.1.1.4 MIMO-OFDM	26
3.1.2 Canali da 40 MHz (Channel Bonding).....	26
3.2 Miglioramenti del livello MAC.....	28
3.2.1 Packet Aggregation and Block Acknowledgement	28
3.2.1.1 Frame Aggregation	28

3.2.1.2 Block Acknowledgement	31
3.3 Benefici introdotti da IEEE 802.11n	31
4. IEEE 802.11ac (draft)	32
4.1 Evoluzioni Radio	33
4.1.1 Banda di frequenze superiori e maggiore ampiezza di canale	33
4.1.2 Evoluzione a livello di modulazione e maggior numero di spatial streams	34
4.2 MU-MIMO	35
4.3 Conclusioni	38
Acronimi	40
Bibliografia e sitografia	43

INDICE delle FIGURE

Figura 1: gli standard 802.11.....	6
Figura 2: confronto tra lo <i>stack</i> del modello IEEE e i primi due livelli della pila ISO/OSI.....	7
Figura 3: <i>stack</i> di IEEE 802.11.....	7
Figura 4: canali WiFi nella banda ISM dei 2.4 GHz.....	14
Figura 5: formato del frame di 802.11g con <i>long preamble</i>	16
Figura 6: formato del frame di 802.11g con <i>short preamble</i>	17
Figura 7: formato del frame di 802.11g ERP-OFDM.....	17
Figura 8: formato del frame di 802.11g DSSS-OFDM con <i>long preamble</i>	18
Figura 9: formato del frame di 802.11g DSSS-OFDM con <i>short preamble</i>	19
Figura 10: differenza tra le tecniche RTS/CTS e CTS-to-SELF(introdotta da 802.11g).....	20
Figura 11: <i>multipath fading</i>	23
Figura 12: rappresentazione grafica della tecnica MIMO.....	23
Figura 13: esempio di un sistema SDM (Spatial Division Multiplexing).....	25
Figura 14: rappresentazione grafica delle tecniche di elaborazione del segnale implementate da MIMO.....	26
Figura 15: incremento delle portanti per OFDM in 802.11n.....	27
Figura 16: <i>overhead</i> in 802.11.....	28
Figura 17: <i>frame aggregation</i>	28
Figura 18: schema funzionale dello scambio di servizi fra i vari livelli dello <i>stack</i> protocollare.....	29
Figura 19: MSDU <i>aggregation</i>	30
Figura 20: MPDU <i>aggregation</i>	30
Figura 21: maggiore ampiezza per i canali utilizzati in 802.11ac.....	34
Figura 22: incremento dei data rate grazie alla modulazione 256-QAM in 802.11ac.....	34
Figura 23: costellazioni delle modulazioni 64-QAM e 256-QAM.....	35
Figura 24: MIMO vs MU-MIMO.....	36

INDICE delle TABELLE

Tabella 1: confronto fra le bande ISM.....	12
Tabella 2: evidenzia il prediletto utilizzo della banda ISM 2.4 GHz dagli standard WiFi.....	12
Tabella 3: confronto tra le tecniche impiegate dagli standard 802.11 a/b/g.....	21
Tabella 4: “ <i>Modulation and Coding Scheme</i> ” (MCS) standard 802.11n.....	27
Tabella 5: nuove funzionalità previste dal progetto IEEE 802.11ac.....	32
Tabella 6: data rate 802.11ac grazie a canali più ampi e un maggior numero di <i>spatial stream</i>	33
Tabella 7: esempi di possibili configurazioni in 802.11ac.....	37

INTRODUZIONE

Questa tesi ha come oggetto l'esposizione, l'evoluzione e l'applicazione delle funzionalità fornite dagli standard per le WLAN, nei servizi di telecomunicazioni. Tratterò il processo evolutivo che partendo dallo standard iniziale IEEE 802.11 e passando per gli standard IEEE 802.11b/g/n ha portato a definire la versione draft IEEE 802.11ac in via di approvazione definitiva. Dopo una descrizione generale dello standard IEEE 802.11 (capitolo 1), esporrò le peculiarità di 802.11g e 802.11n, rispettivamente nei capitoli 2 e 3, fino ad arrivare alla versione 802.11ac.

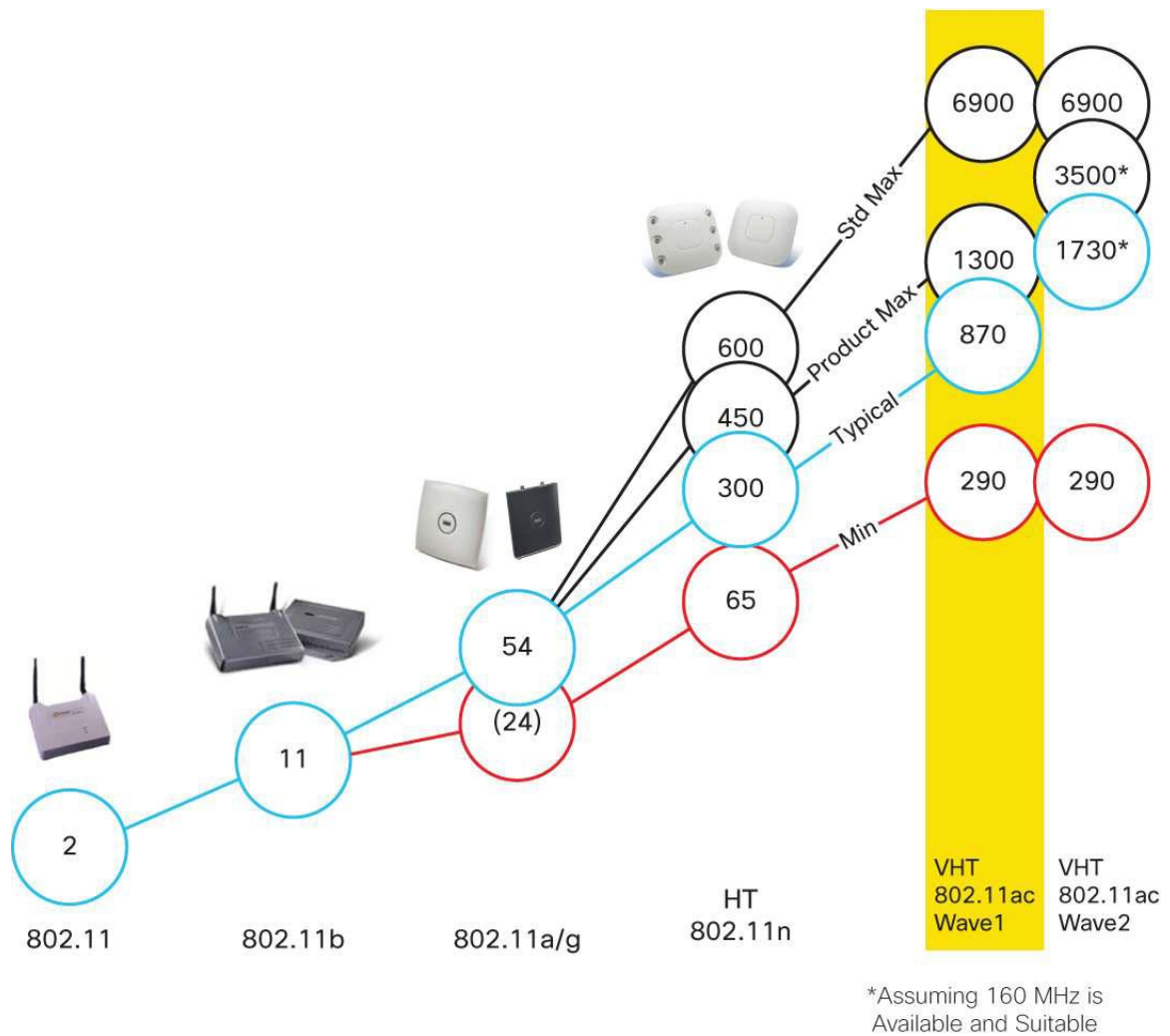


Figura 1: Standard 802.11 (WiFi).

1.IEEE 802.11

IEEE 802.11 definisce un insieme di standard per le reti Wireless Local Area Network (WLAN), rete locale che usa la tecnologia wireless, invece di una connessione cablata via cavo.

Questo standard, sviluppato dal gruppo 11 dell'IEEE 802, commissione dell'Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), incaricato da ISO (International Organization for Standardization) di sviluppare standard per reti locali (LAN) e metropolitane (MAN), definisce i livelli Media Access Control (MAC) e fisico (PHY) per una WLAN.

Nello specifico, lo standard 802.11 definisce solo i due livelli più bassi della pila ISO/OSI suddividendoli in sottolivelli (sublayers), come illustrato nelle Figure 2 e 3.

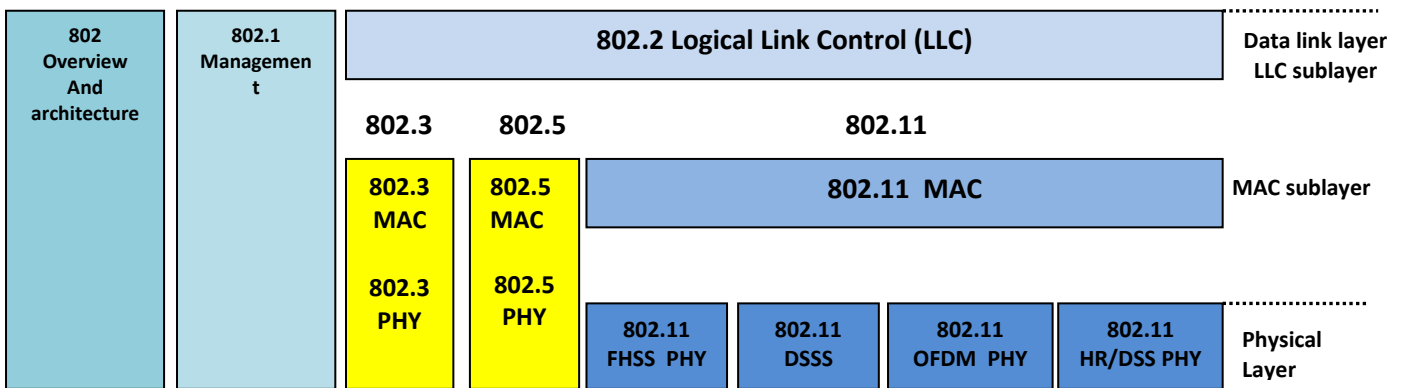


Figura 2: Confronto tra lo stack del modello IEEE e i primi due livelli dello pila ISO/OSI.

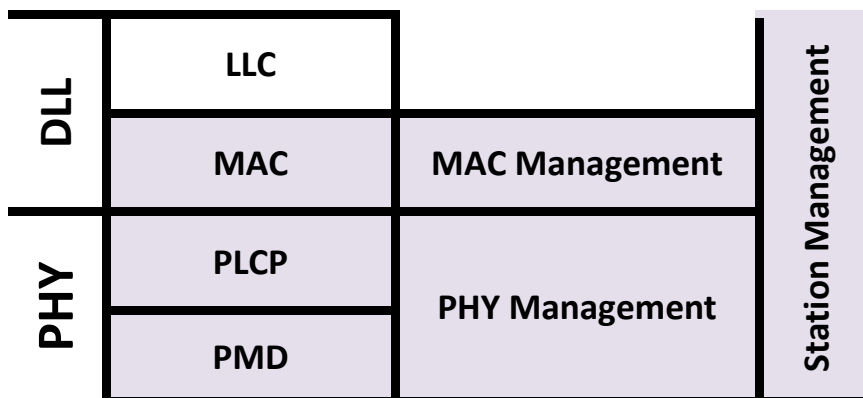


Figura 3: Stack di IEEE 802.11

Come mostrato in Figura 3, il livello fisico di 802.11 è diviso in due sottolivelli: PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) e PMD (Physical Medium Dependent); mentre il MAC (Medium Access Control) fa parte del secondo livello DLL (Data Link Layer).

1.1 PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)

Svolge la funzione di adattamento dei dati per la comunicazione tra lo strato fisico e lo strato MAC.

Ossia, traduce i frame provenienti dal MAC, indicati come MAC Protocol Data Unit (MPDU), nel formato opportuno alla trasmissione.

Come vedremo meglio in seguito, esistono due tipi di formati per i frame di PLCP: con preambolo lungo, che deve essere supportato da tutti i dispositivi 802.11b, e con preambolo corto, opzione che ha l'obiettivo di migliorare l'efficienza (throughput) di una rete (che verrà trattato in seguito in 802.11g).

1.2 PMD (Physical Medium Dependent)

Si occupa della trasmissione e della ricezione dei segnali tra due stazioni su Radio Frequenza (RF).

In particolare, PMD effettua la modulazione e la demodulazione del segnale secondo le specifiche previste dallo standard.

Inoltre, deve fornire al livello MAC un'indicazione sull'attività di trasmissione sul mezzo da parte di altre sorgenti mediante il meccanismo di Carrier Sense (ascolto della portante).

1.3 MAC (Medium Access Control)

Il livello **MAC**, invece, si occupa di:

- Gestione e controllo delle procedure di accesso al canale
- Indirizzamento al livello di collegamento
- Controllo d'errore
- Frammentazione e riassettaggio dei frame

Nello standard 802.11 le stazioni condividono lo stesso mezzo trasmissivo con la possibilità che si verifichino collisioni nel caso due o più stazioni trasmettano contemporaneamente.

Per questo, la funzionalità più complicata che il livello MAC deve implementare è quella delle procedure di accesso al mezzo poiché presenta numerose problematiche, non presenti nei sistemi cablati, dovute, fondamentalmente, dalle caratteristiche del mezzo fisico utilizzato.

I principali problemi sorgono dall'impossibilità di utilizzare il protocollo di accesso multiplo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), per le seguenti ragioni:

- *Impossibilità da parte di una stazione mobile di ascoltare il canale mentre sta trasmettendo*, due stazioni che trasmettono contemporaneamente non sono in grado di accorgersi se si sta verificando una collisione. Ciò è dovuto perché, per motivi di costi, generalmente la maggior parte dei stazioni radio sono dotate di una sola antenna, quindi lavorano in *half-duplex* (o trasmettono o ricevono).
- *Problema della stazione nascosta (hidden station problem)*, che si verifica quando alcuni nodi della rete non si rilevano tra di loro: è possibile che due stazioni riescano a comunicare con l'AP (Access Point) ma, a causa della distanza a cui si trovano e degli ostacoli presenti nell'ambiente in cui operano (fading), non riescano a "sentirsi" tra di loro. Quindi, una stazione può interrompere la trasmissione dell'altra perché non è in grado di rilevare che il canale è occupato; mentre alla base della tecnica di Collision Detection c'è l'assunzione che tutte le stazioni possano sentirsi l'un l'altra.
- *Problema della stazione esposta*, si verifica quando una stazione ascoltando il canale sente che è impegnato in una trasmissione tra altre due stazioni concludendo erroneamente di non poter trasmettere; invece, potrebbero esserci delle stazioni fuori dai raggi di copertura sia della stazione trasmittente sia della stazione ricevente impegnate nella comunicazione con le quali è possibile effettuare trasmissioni parallelamente e senza interferenze.

Per questo motivo si sono progettate delle modalità di accesso al mezzo proprie per le reti wireless, la prima obbligatoria e la seconda opzionale: Distributed Coordination Function (DCF) e Point Coordination Function (PCF).

1.4 DCF (Distributed Coordination Function)

Si basa sull'utilizzo del protocollo Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) con Acknowledgment (ACK).

In questo protocollo, ogni stazione che ha dati da trasmettere deve verificare se un'altra stazione sta trasmettendo in quel momento (Carrier Sense), e se trova il "canale" occupato si pone in attesa. Quando il mezzo si libera la stazione che deve trasmettere aspetta che il mezzo rimanga tale per un intervallo di tempo fissato, (DIFS: Distributed InterFrame Space), al termine

del quale non trasmette subito ma aspetta per un intervallo di tempo casuale (calcolato mediante algoritmo di backoff) prima di inoltrare i dati nel canale.

Poiché CSMA/CA non fa affidamento sulla capacità delle stazioni di rilevare collisioni ascoltando le proprie trasmissioni, la stazione destinataria, dopo un tempo di attesa per i messaggi di risposta (SIFS: Short InterFrame Space), invia un pacchetto di conferma (ACK) per segnalare che la trasmissione è avvenuta con successo.

1.5 PCF (Point Coordination Function)

Questo servizio, a differenza del primo, ha una funzione di coordinamento centralizzata.

Il PCF prevede la presenza di un nodo detto Point Coordinator (PC), che solitamente coincide con l'Access Point, che ha il compito di assegnare, di volta in volta, il diritto a trasmettere. Il PC, che agisce come un classico sistema di Polling, effettua l'interrogazione ciclica di tutte le stazioni e solo la stazione a cui invia il pacchetto di POLL ha il diritto ad inoltrare i dati. Poiché può trasmettere solo la stazione in possesso del pacchetto di POLL non possono verificarsi collisioni.

2. IEEE 802.11g

Lo standard 802.11 venne presentato nel 1997 e prevedeva tre tecniche di trasmissione (Infrarosso diffuso, FHSS e DSSS), tutte a 1 e 2 Mbps. Di queste tre tecniche di trasmissione però solamente la *direct sequence spread spectrum* (DSSS) è stata implementata a livello commerciale.

Le prestazioni fornite, però, con l'avanzare delle tecnologie wireless risultarono insufficienti, e così, due anni dopo, furono approvati due nuovi standard:

- **802.11 b** : compatibile con 802.11, aggiungeva a quest'ultimo due nuove velocità 5.5 Mbps e 11 Mbps, lasciando invariato il numero di canali, la larghezza di banda per canale e le tecniche di accesso al mezzo.
- **802.11 a**: tramite la modulazione OFDM, che verrà trattata in seguito, poteva raggiungere una velocità massima di 54 Mbps nello spettro di frequenze della banda ISM nell'intorno dei 5 GHz.

Nel 2003, venne ratificato il protocollo 802.11g, che implementava le stesse funzionalità di 802.11a, estendendole alla stessa banda di frequenza di 802.11b, ossia la banda ISM dei 2.4 GHz, restando quindi con quest'ultimo totalmente compatibile (interoperabile).

(Nota: quando dispositivi 802.11g si trovano ad operare con schede di rete di tipo b, i primi devono ridurre la velocità di trasmissione a quella dello standard 802.11b).

In breve, il nuovo standard non introduceva grandi rivoluzioni rispetto ai suoi predecessori, ma ne migliorava le prestazioni incrementando il data rate massimo possibile nella banda dei 2.4 GHz. Infatti, è importante sottolineare che all'aumentare della frequenza diminuiscono le distanze raggiungibili dal segnale, poiché aumentano gli effetti di riflessione (*Multipath*) e assorbimento delle onde elettromagnetiche. Per questi motivi, le prestazioni di 802.11g sono preferibili, a parità di velocità di trasmissione, rispetto al precedente 802.11a.

Le bande in cui lavorano questo standard e i precedenti appartengono al gruppo delle **bande ISM** (Industrial, Scientific and Medical).

Questo nome venne assegnato dall'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU - T) a delle porzioni dello spettro elettromagnetico, nel campo delle microonde.

Alcune ISM sono le seguenti

902 – 928 MHz

2400 – 2483.5 MHz

5725 – 5850 MHz

Queste bande possono essere utilizzate senza dover richiedere licenze purché vengano rispettati precisi limiti di potenza (potenza massima di 100 mW in Europa). L'uso di queste bande può differire da Paese a Paese a causa di specifiche regolamentazioni.

Pertanto, come mostrato in Tabella 1, presto si cominciarono ad utilizzare tali bande per sistemi di comunicazioni wireless LAN.

	I	II	III
Frequenza	902-928	2.4-2.4835	5.725-5.850
Larghezza Banda	26MHz	83.5MHz	125 MHz
Necessità di licenza FCC	No	No	No
Utilizzabilità	USA/Canada	Ovunque	Usa/Canada
Costo tecnologia	Basso (Si)	Basso/Medio (Si, GAAS)	Alto (GaAS)
Sorgenti di interferenza	Telefoni cellulari	WiFi /WLAN -Bluetooth	Alcuni Radar - WiFi /WLAN

Tabella 1: Confronto tra le bande ISM.

Attualmente la banda ISM più utilizzata e, di conseguenza, la più affollata è la seconda (è utilizzabile senza licenza in tutto il mondo), anche per le WLAN come è evidenziato in Tabella 2.

Standard	Frequenza	Velocità di Trasferimento(Mbit/s)
802.11 legacy	FHSS, 2.4GHz, IR	1, 2
802.11a	5.2 5.4 5.8 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
802.11b	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11
802.11g	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54
802.11n	2.4 GHz, 5.4 GHz	1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54, 125

Tabella 2: Vengono illustrati i vari standard con i rispettivi data rate e le bande di frequenza in cui operano e, come si vede, quasi tutti utilizzano la banda ISM dei 2.4 GHz (tranne 802.11a).

Essendo bande piuttosto strette, non necessitando di licenze ed aperte a chiunque volesse usarle (con il solo vincolo della potenza), si arrivò ad un livello di interferenza inammissibile e ciò portò l'ITU ad imporre l'uso della tecnica di modulazione **SPREAD SPECTRUM (SS)** per la trasmissione in banda ISM, al fine di limitare le interferenze tra i vari dispositivi radio che usano la stessa banda.

Questa tecnica consiste nel distribuire il segnale su una banda molto più larga del necessario, in modo che esso venga percepito come rumore dai dispositivi non interessati.

Ne esistono due varianti: Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) e Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).

2.1 FHSS (Frequency Hopping SS)

Tutta la banda disponibile viene suddivisa in un insieme di sottocanali di uguale larghezza, la banda ISM dei 2.4 GHz in Europa è suddivisa in 79 canali, ognuno dei quali è largo 1 MHz.

Tale metodo, quindi, suddivide il segnale in piccoli segmenti e "salta" da una frequenza portante ad un'altra (per secondo) mentre trasmette tali segmenti.

La trasmissione, in pratica, avviene per un certo periodo di tempo su un canale per poi passare ad un altro secondo uno "schema di salto" noto sia a mittente che a destinatario che definisce la sequenza in cui essi utilizzeranno i diversi sottocanali.

Tale schema è unico per ogni coppia trasmettitore-ricevitore, che utilizza il medesimo range di sottocanali, e ha il compito di minimizzare la probabilità che due utenti utilizzino la stessa sottobanda contemporaneamente consentendo, così, a più utenti di condividere lo stesso insieme di frequenze senza entrare in conflitto.

Il vantaggio di tale sistema, quando il rapporto tra la larghezza di banda del segnale originale e quella del segnale di diffusione è molto grande, è di offrire grande immunità alle interferenze e alle intercettazioni. Tuttavia, poiché ogni salto di frequenza aggiunge un carico al flusso di dati, le trasmissioni FHSS sono relativamente lente.

2.2 DSSS (Direct Sequence SS)

La banda dei 2.4 GHz viene suddivisa in 14 canali da 22 MHz, dove i canali adiacenti (1, 4, 7, 10, 13) si sovrappongono tranne tre, quelli la cui distanza è di almeno 25 MHz, che sono completamente non sovrapposti e possono operare simultaneamente nella stessa area. Ad esempio, i canali 1, 7, 13 non si sovrappongono. (Figura 4)

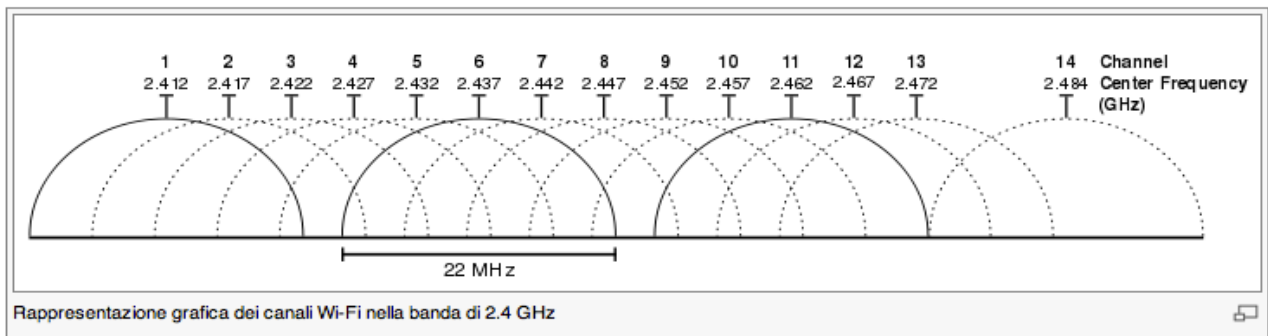


Figura 4: Rappresentazione grafica dei canali WiFi nella banda ISM dei 2.4 GHz.

In questa tecnica ogni bit viene trasmesso come una sequenza prefissata di valori, detti “chip”, dove maggiore è la durata del chip maggiore è la probabilità che i dati originari possano essere recuperati.

Per diffondere il segnale radio su un singolo canale con banda a 22 MHz, nello standard 802.11b ogni bit viene trasmesso come una sequenza ridondante di 11 bit, detta *sequenza di Barker*, che semplifica il riassetto per ricomporre il flusso di dati originario in ricezione. (La sequenza di Barker codifica i bit 1 come 10110111000 e i bit 0 come 01001000111.)

Ogni collegamento DSSS, a differenza di FHSS, utilizza un solo canale per la trasmissione del segnale senza alcun salto di frequenza.

Tale metodo è indicato per la trasmissione e la ricezione di segnali deboli poiché il segnale trasmesso consumerà, chiaramente, una maggior larghezza di banda.

DSSS consente l'interoperabilità delle reti a 11 Mbps con le reti wireless a 1 e 2 Mbps e offre maggior robustezza contro l'interferenza tra simboli (ISI) e il rumore; però, non offre benefici contro l'interferenza tra canali adiacenti e per questo motivo tale interfaccia è poco usata nelle applicazioni reali delle WLAN.

L'uso combinato di DSSS e delle modulazioni DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying, in grado di trasmettere 1 bit per simbolo) e DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying, in grado di trasmettere 2 bit per simbolo), permette di raggiungere, rispettivamente, i data rate di 1 Mbps e 2 Mbps rendendo, così, compatibile lo standard IEEE 802.11g con IEEE 802.11b, per 1 e 2 Mbps.

Invece, per aumentare la velocità di trasmissione dei segnali fino a 11 Mbps, lasciando inalterata la banda impegnata, lo standard 802.11b, al posto della sequenza di Barker, utilizza la tecnica di *codifica Complementary Code Keying (CCK)*.

I codici CCK permettono di codificare più bit dati in un solo chip utilizzando chip con valori complessi quaternari ($\pm 1, \pm j$), piuttosto che chip a valori binari reali (± 1), aumentando così il

numero di parole di codice disponibili (perché aumenta l'alfabeto dei simboli), e, di conseguenza, il data rate (trasmetto più informazione nello stesso tempo), a parità di banda.

Lo standard 802.11g crea un punto di convergenza tra gli standard 802.11a e 802.11b: utilizza, oltre alla modulazione a singola portante SS, il medesimo schema di modulazione **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)** di 802.11a, garantendone il medesimo data rate massimo, ma opera, rispetto a quest'ultimo, nella più ristretta banda ISM dei 2.4 GHz, consentendo così l'interoperabilità con IEEE 802.11 e IEEE 802.11b.

La modulazione OFDM permette di suddividere il flusso informativo in più parti che vengono trasmesse parallelamente su frequenze portanti differenti (sottoportanti sinusoidali), ortogonali tra loro, ognuna modulata singolarmente, ciò permette di incrementare ulteriormente la velocità di trasmissione (>11 Mbps).

Nello standard 802.11a queste sottoportanti sono 52 (48 per i dati e 4 per la sincronizzazione) e consentono di effettuare la trasmissione fino ad una velocità di trasmissione di 54 Mbps.

Le nuove funzionalità dello standard IEEE 802.11g, che coinvolgono sia lo strato PHY sia lo strato MAC, sono: "4 strati fisici differenti", supporto obbligatorio del preambolo corto e meccanismi di protezione di nuova definizione che si occupano degli aspetti di interoperabilità.

2.3 Il livello fisico offre 4 differenti tipi di codifica dell'informazione (" 4 strati fisici differenti ")

Mentre lo standard IEEE 802.11b usa solo la tecnica DSSS (spiegata precedentemente), IEEE 802.11g utilizza DSSS, OFDM o entrambi.

IEEE 802.11g definisce diverse velocità di trasmissione dati attraverso 4 diversi schemi di modulazione che coesistono grazie alla specifica di rete *Extended Rate Physicals (ERP)*, che altro non è che l'implementazione del PHY per la modulazione DSSS e OFDM.

I quattro diversi tipi di codifica, di cui due obbligatori per i dispositivi IEEE 802.11g e due opzionali, sono:

- **ERP - DSSS/CCK (obbligatorio):** questo è lo strato fisico utilizzato da 802.11b e fornisce, quindi, lo stesso data rate.
- **ERP - OFDM (obbligatorio):** introdotto da 802.11g e fornisce le stesse velocità di 802.11a.
- **ERP - DSSS/PBCC (opzionale):** usa la tecnica DSSS introdotta da 802.11b, dove il massimo data rate è 11 Mbps, con l'algoritmo *Packet Binary Convolution Coding (PBCC)*, che estende il campo delle velocità con l'aggiunta di 22 e 33 Mbps.

- **DSSS - OFDM (opzionale):** combinazione di DSSS e OFDM, l'header viene trasmesso mediante DSSS e il payload (PSDU) con OFDM, consentendo la coesistenza di dispositivi 802.11b e 802.11g.

2.4 Supporto obbligatorio per il preambolo corto (*short preamble*)

L'overhead a livello fisico è causato dal preambolo di PLCP (Physical Layer Convergence Protocol), necessario per la sincronizzazione e dal PLCP Header che contiene tutte le informazioni associate allo strato fisico.

Il gruppo 802.11b riconobbe che l'overhead di PLCP era eccessivo e propose un *preambolo corto*, come opzione da concordare tra sender e receiver, per migliorare le prestazioni di rete (percentualmente, con il preambolo corto ottengo un'efficienza maggiore perché trasmetto più payload rispetto alle informazioni di servizio).

In IEEE 802.11g sono possibili quattro diversi formati del frame PLCP, due obbligatori e due opzionali, associati ad ognuno dei 4 strati fisici implementabili per questo standard.

2.4.1 IEEE 802.11 g con preambolo lungo (= 802.11 b long preamble)

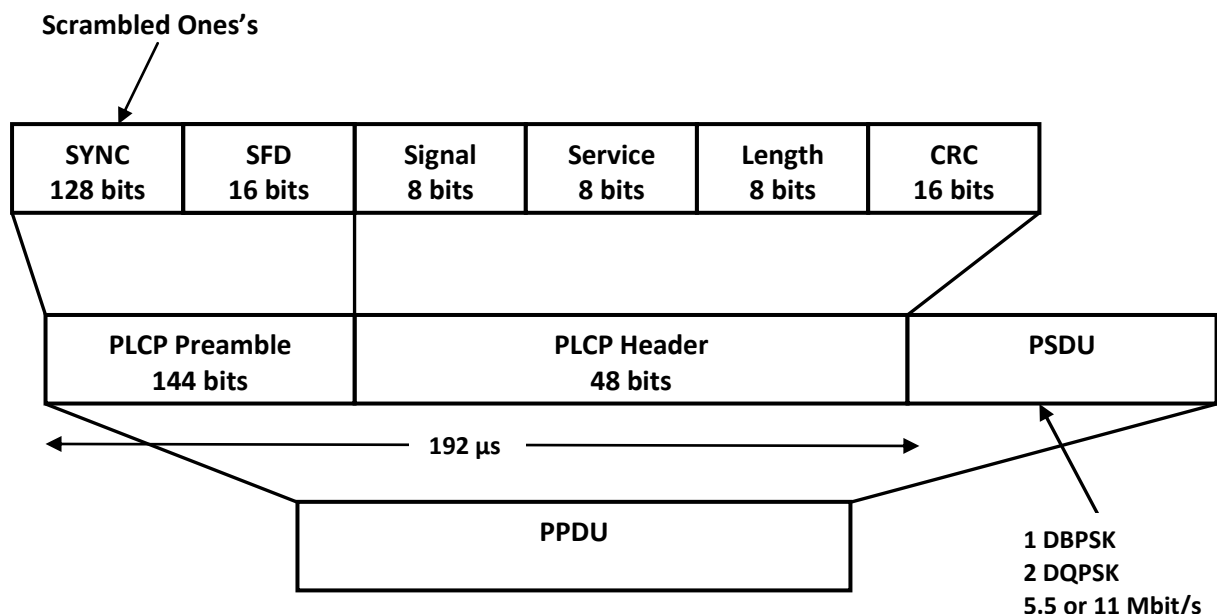


Figura 5: Formato per PPDU di 802.11g con *long preamble*.

Questo frame, Figura 5, coincide con quello di 802.11b con preambolo lungo, infatti ci sono 128 bit per il campo SYNC e anche altri campi coincidono. Preambolo e header sono trasmessi a 1 Mbps utilizzando DBPSK. Il payload PSDU, (PLCP Service Data Unit), può essere trasmesso a 1, 2, 5.5 e 11 Mbps.

2.4.2 802.11 g con preambolo corto (= 802.11 b short preamble)

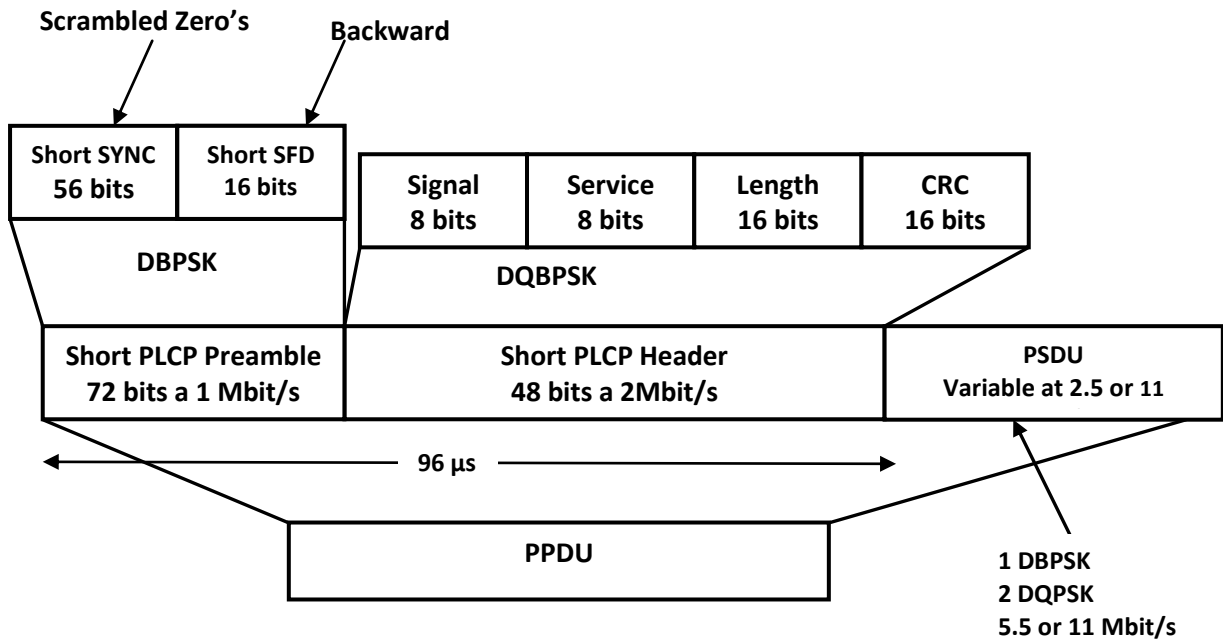


Figura 6: Formato per PPDU di 802.11g con *short preamble*.

Nel formato con preambolo corto (Figura 6), non compatibile con 802.11, abbiamo 56 bit per il campo SYNC e la differenza, rispetto al formato con *long preamble*, è che solo la sincronizzazione e lo short SFD (Start Frame Delimiter) sono trasmessi a 1 Mbps, la seconda parte, PLCP-Header, è trasmessa a 2 Mbps utilizzando DQPSK. Il payload, PSDU, può essere trasmesso a 2, 5.5 e 11 Mbps.

Come si può notare dalla Figura 5 e dalla Figura 6, il ritardo di trasmissione passa da 192 μ s se il frame PLCP utilizza il preambolo lungo a 96 μ s con il preambolo corto con conseguente incremento dell'efficienza complessiva della trasmissione.

2.4.3 IEEE 802.11 g ERP – OFDM (= 802.11 a)

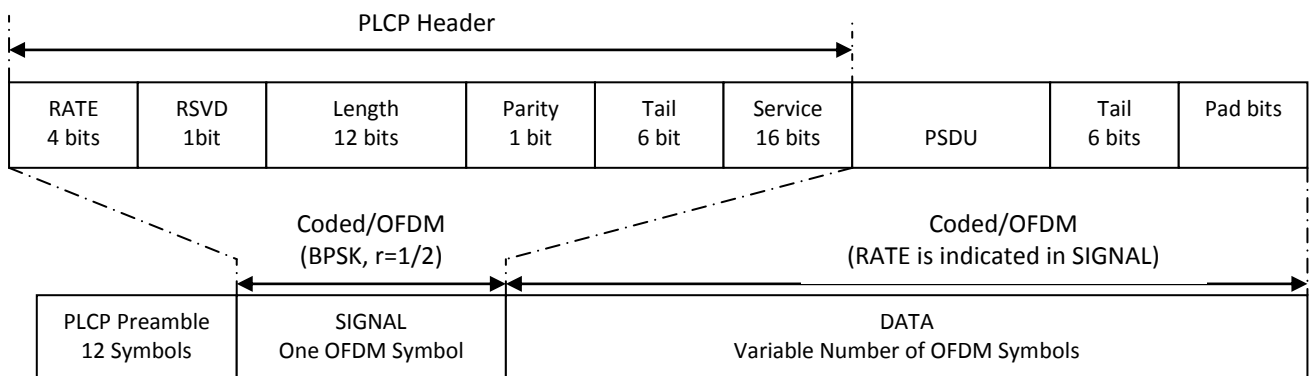


Figura 7: Formato per PPDU di 802.11g ERP-OFDM.

Si usa il formato in Figura 7 quando tutte le stazioni sono abilitate a supportare la modulazione OFDM; il frame ha lo stesso formato di quello di 802.11a, infatti ritroviamo tutte le velocità di quest'ultimo. (L'header ha una lunghezza di soli 40 bit, il preambolo PLCP, usato per la sincronizzazione, è un puro intervallo di tempo che non contiene bit e dura 16 ms).

2.4.4 IEEE 802.11 g DSSS-OFDM (opzionale)

Con la combinazione tra DSSS e OFDM posso arrivare a 54 Mbps e come per lo standard IEEE 802.11b, per conseguire la retrocompatibilità con tale standard, posso scegliere tra due diverse configurazioni per il frame PLCP: con preambolo lungo o corto.

In entrambi i formati, la prima parte (Preamble + Header) viene trasmessa mediante la tecnica DSSS, la seconda (payload PSDU) con OFDM.

Vengono mostrati di seguito i formati possibili, il primo con l'uso del *long preamble* (Figura 8) e il secondo con *short preamble* (Figura 9):

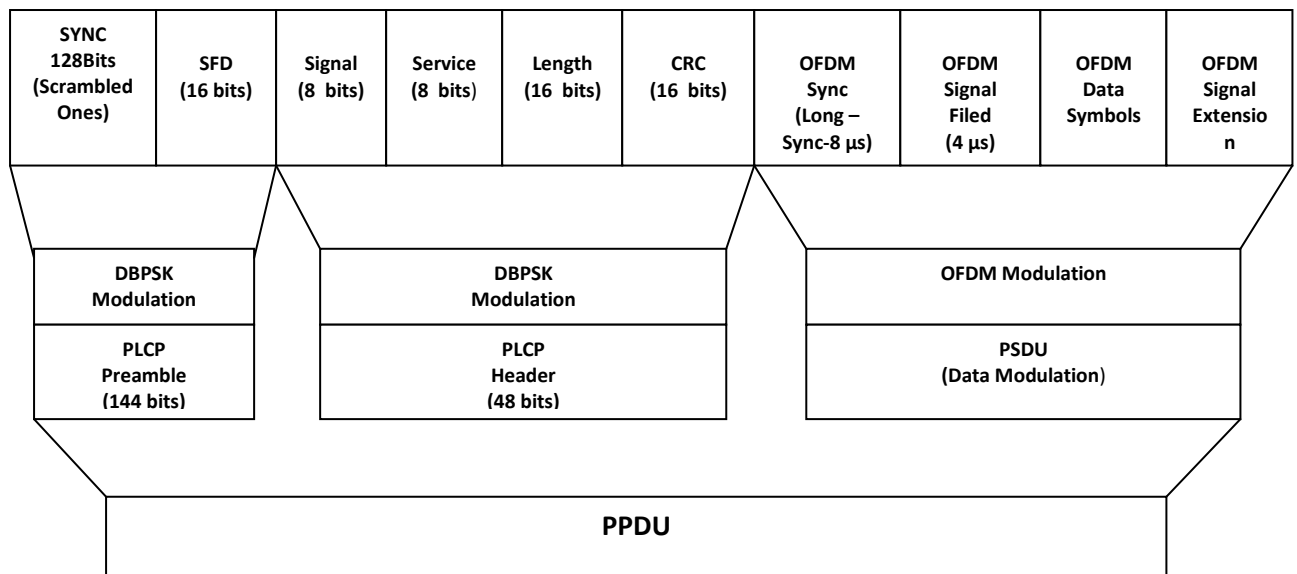


Figura 8: Formato per PDU di 802.11g DSSS - OFDM con *long preamble*.

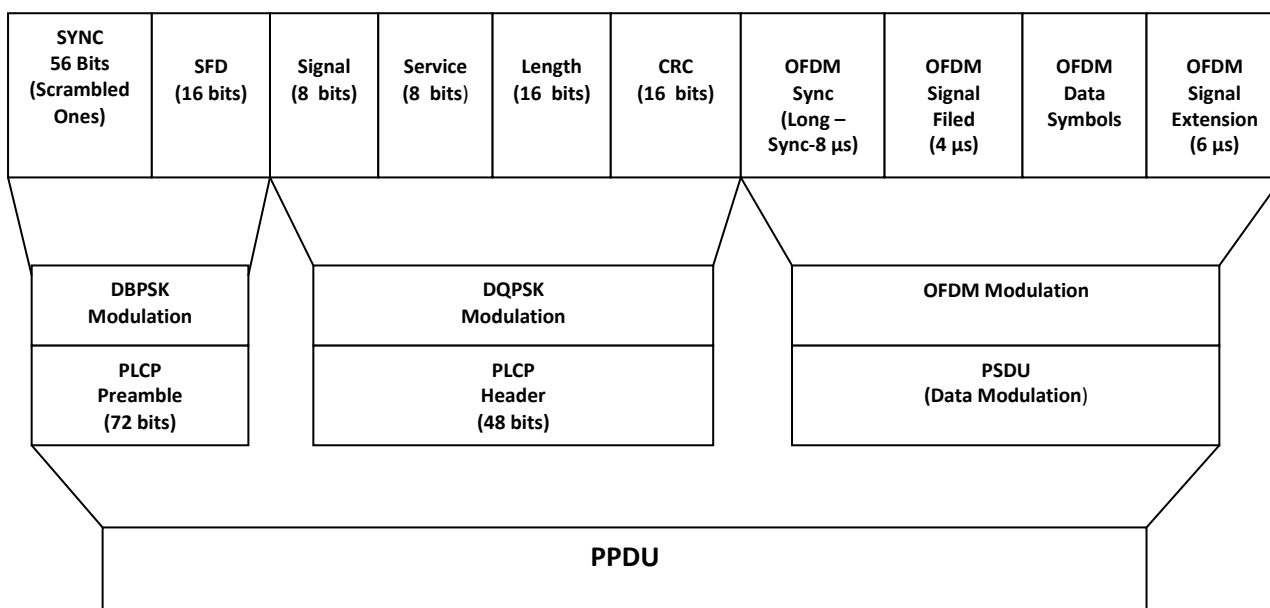


Figura 9: Formato per PPDU di 802.11g DSSS - OFDM con *short preamble*.

Come si può notare dalle Figure 8 e 9, la somma della lunghezza in bit dell'header e del preambolo corto PLCP non è la metà di quella col preambolo lungo perché solo la seconda metà (header) viaggia a velocità doppia.

Per concludere questo punto, se mittente e destinatario supportano entrambi l'opzione di "short preamble" 802.11 g ne raccomanda l'uso per effettuare la comunicazione poiché intestazioni più brevi comportano un conseguente risparmio di banda e tempo di trasmissione.

2.5 Meccanismi di protezione di nuova definizione che si occupano degli aspetti di interoperabilità.

In una rete IEEE 802.11g, le stazioni possono scegliere tra 14 differenti data rate e 4 strati fisici per trasmettere un pacchetto nel modo più opportuno, di conseguenza in 802.11g sono possibili diversi tipi di stazioni:

- **Stazioni ERP:** supportano ERP – OFDM, operano in accordo con 802.11g puro.
- **Stazioni NON – ERP:** sono stazioni che implementano al livello PHY lo standard 802.11b aggiornato per supportare il preambolo corto (→ supportano fino a 11 Mbps).
- **Stazioni NON – ERP che NON supportano il preambolo corto**

Lo scenario variegato in cui ci si imbatte utilizzando IEEE 802.11g presenta dei problemi di interoperabilità. Infatti, considerando una rete composta da stazioni ERP e NON-ERP, se per esempio l'AP impone uno strato fisico OFDM le stazioni NON-OFDM non sono in grado di

accorgersi se le stazioni OFDM stanno comunicando aumentando la probabilità di collisione. Si sono trovate, allora, tre diverse soluzioni per evitare collisioni: utilizzare la modulazione DSSS-OFDM, impiegare la tecnica *Request-to-Send/Clear-to-Send* (RTS/CTS) in DSSS o adoperare il nuovo meccanismo di protezione CTS-to-Self introdotto da 802.11g.

2.5.1 Modulazione DSSS-OFDM

L'utilizzo della modulazione DSSS-OFDM fa in modo che le stazioni NON-OFDM sentano il canale occupato (e non trasmettano) anche se non possono ricevere il pacchetto OFDM, e questo è un limite.

2.5.2 RTS/CTS in DSSS

La tecnica RTS/CTS, *Request-to-Send/Clear-to-Send*, (4-way handshaking, mostrata in Figura 10 a confronto con CTS-to-Self) in DSSS fa sì che anche le stazioni NON-OFDM riescano a capire se il canale è occupato e quindi permette di proteggere i pacchetti OFDM: tutte le stazioni, sia ERP che NON-ERP, vengono informate della trasmissione in entrata anche se il pacchetto viene trasmesso in OFDM. Ovviamente, se la rete è composta solo da stazioni ERP non è necessario usare RTS/CTS poiché tutte le stazioni sono in grado di rilevare una trasmissione OFDM. Con RTS/CTS si riesce, anche, a gestire meglio il problema del terminale nascosto.

2.5.3 CTS-to-SELF

Il meccanismo ***CTS-to-Self*** è una soluzione alternativa introdotta da 802.11g per evitare le collisioni causate dai problemi di interoperabilità DSSS/OFDM, che non risolve il problema del terminale nascosto ma riduce l'overhead rispetto a RTS/CTS perché trasmette un solo pacchetto anziché due (3-way handshaking): la stazione che deve trasmettere avverte le altre stazioni mandando solamente un CTS (che non viene però ascoltato dai terminali nascosti). Osservando la Figura 10 si possono analizzare i differenti modi di operare delle due tecniche: RTS/CTS e CTS-to-SELF.

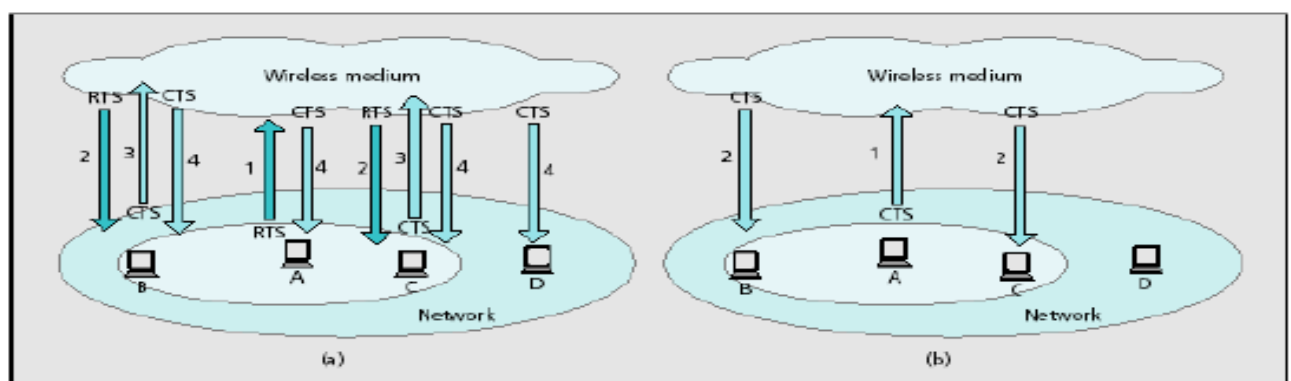


Figura 10: Differenze tra le tecniche RTS/CTS e CTS-to-self prima che un mittente inizi a trasmettere un pacchetto dati.

Nello scenario (a): la stazione A vuole inviare un pacchetto a C. A trasmette un frame RTS (freccia 1), che viene ricevuto da tutte le stazioni presenti nel suo campo di copertura di rete, ossia da B e C (freccie con il numero 2). B e C inviano un frame CTS (freccie con il numero 3) che viene ricevuto da tutte le stazioni (freccie con il numero 4). La stazione D non ha ricevuto l'RTS, poiché essendo fuori dal raggio di copertura di A risulta "nascosta" per il mittente, ma ha acquisito il CTS inviato da C accorgendosi così che la rete è impegnata e astenendosi dalla trasmissione → superata la collisione da terminale nascosto. A, dopo la ricezione del frame CTS, inizia a trasmettere il suo pacchetto dati a C. Lo scenario (b) illustra, invece, il meccanismo CTS-to-self. A vuole comunicare con C ma in questo caso invece di un frame RTS manda un frame CTS (freccia 1), che viene ricevuto sia da B che da C (freccie con il numero 2). B vede che il CTS non è destinato a lui e non trasmette, C capisce di essere impegnato nella comunicazione con A ma non può rispondere con un altro CTS perché la procedura non lo prevede. Il problema ora è che D, che non è nella copertura di A, non riceve il CTS e quindi non rileva la trasmissione e può andare in collisione → non è risolto il problema del terminale nascosto. Questa procedura, perciò, risulta efficace quando non ci sono terminali nascosti, cioè quando tutti i terminali sono tra loro in copertura, in caso contrario è preferibile usare RTS/CTS.

In conclusione del primo capitolo propongo la Tabella 3 che riassume gli standard fin qui citati e le loro caratteristiche di interoperabilità.

Data rate (Mbps)	802.11b		802.11g		802.11a	
	Mand.	Opt.	Mand.	Opt.	Mand.	Opt.
1	Barker		Barker			
2	Barker		Barker			
5.5	CCK	PBCC	CCK	PBCC		
6			OFDM	CCK-OFDM	OFDM	
9				CCK-OFDM; OFDM		OFDM
11	CCK	PBCC	CCK	PBCC		
12			OFDM	CCK-OFDM	OFDM	
18				CCK-OFDM; OFDM		OFDM
22				PBCC		
24				CCK-OFDM	OFDM	
33				PBCC		
36				CCK-OFDM; OFDM		OFDM
48				CCK-OFDM; OFDM		OFDM
54				CCK-OFDM; OFDM		OFDM

Tabella 3: Mand = Mandatory (obbligatorio) Opt = Optional. Nella prima colonna sono elencate i data rate possibili. Nella seconda, terza e quarta colonna sono descritte, rispettivamente, le specifiche di IEEE 802.11b/g/a. Come si può vedere, in 802.11a è presente solo lo strato fisico OFDM: non è prevista alcuna convergenza con gli altri due standard nella banda di frequenze dell'intorno dei 5 GHz. IEEE 802.11g, invece, è più complicato perché si deve implementare in uno scenario in cui possono esistere anche stazioni IEEE 802.11 e 802.11b.

3. IEEE 802.11n

Lo standard IEEE 802.11n, approvato nel 2009, ha introdotto sostanziali miglioramenti, sia al livello PHY che al livello MAC, nelle prestazioni delle WLAN.

Pur restando completamente retrocompatibile (backward compatible) con gli standard IEEE 802.11 a/b/g, supportando allo strato PHY le modulazioni DSSS, OFDM e CCK, ed essendo progettato per operare in entrambe le bande ISM dei 2.4 GHz e 5 GHz, 802.11n offre data rate più elevati (sino a 600 Mbps), maggior portata e affidabilità nel collegamento radio ed una copertura migliore rispetto ai precedenti standard WiFi.

Per ottenere queste più elevate prestazioni, IEEE 802.11n si avvale di nuove funzionalità: l'impiego della modulazione *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) e la possibilità di utilizzare canali ampi 40 MHz, a livello PHY, e la tecnica del *Frame Aggregation* in combinazione a quella del *Block Acknowledgement*, a livello MAC.

3.1 MIGLIORAMENTI LIVELLO PHY

3.1.1 TECNICA MIMO (Multiple Input Multiple Output)

MIMO consiste nell'impiego di più antenne sia a trasmettitore che a ricevitore; questa tecnica permette di trasmettere il flusso dati suddividendolo in frammenti più piccoli, noti anche come "*spatial streams*", ognuno dei quali trasporta dati indipendentemente dagli altri "flussi spaziali" che vengono inviati simultaneamente sulle diverse antenne sfruttando a proprio vantaggio il fenomeno del *multipath fading*, senza richiedere più banda o consumare più energia.

Nelle comunicazioni wireless, fino a questo momento, il *multipath fading* è sempre stato un nemico che limitava il funzionamento di questa tecnologia. Infatti, per un classico collegamento radio in un tipico ambiente indoor (abitazioni, uffici, strutture pubbliche, ecc.) non è realistico assumere l'ipotesi di propagazione *Line Of Sight* (LOS), ossia che la propagazione avvenga dal trasmettitore al ricevitore senza impedimenti nella traiettoria del segnale; anzi, al contrario spesso le antenne impegnate in una comunicazione non si vedono direttamente a causa degli ostacoli frapposti tra loro. Il segnale, scontrandosi su questi ostacoli, subisce delle riflessioni che seguono cammini diversi (*multipath fading*) da quello diretto e che giungono al ricevitore sfasate e con ritardi differenti, attenuando e distortendo il segnale complessivo. (Figura 11)

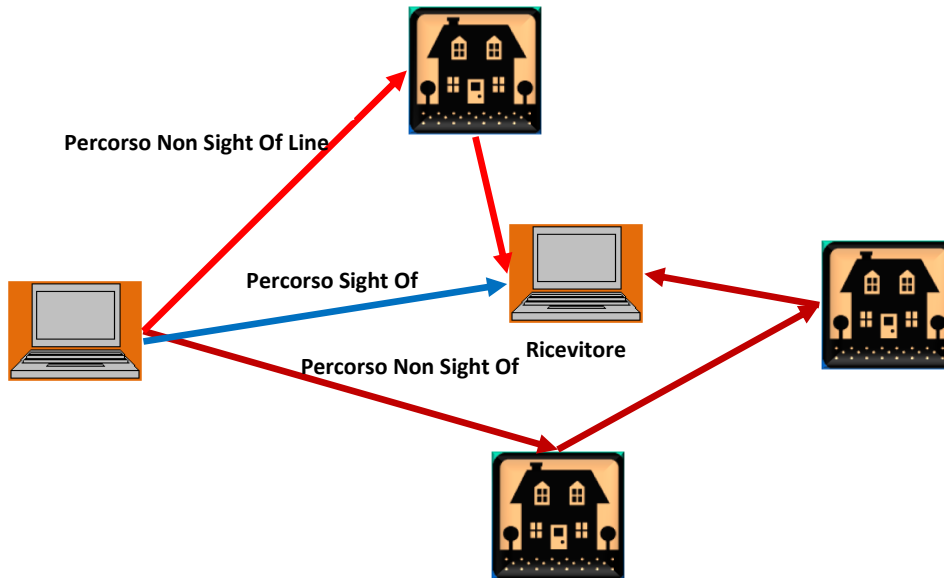


Figura 11: Multipath Fading.

L'utilizzo della tecnologia MIMO in IEEE 802.11n permette di migliorare notevolmente la gestione e il passaggio del segnale radio attraverso le barriere architettoniche, di cui dobbiamo tenere sempre conto in una trasmissione wireless.

A differenza della natura *half-duplex* dei precedenti protocolli (la stazione trasmette, e poi riceve, su una sola antenna alla volta), tipica delle comunicazioni su singolo canale, i nuovi chipset MIMO sono in grado di implementare comunicazioni di tipo *full-duplex* impiegando simultaneamente più antenne.

Queste caratteristiche fanno sì che le tecniche MIMO vengano impiegate non solo per incrementare il data rate ma anche per migliorare l'efficienza spettrale (rapporto tra la velocità di trasmissione e la banda di frequenze utilizzate), la capacità (aumenta la densità di informazione trasportata), la copertura (a parità di frequenza/potenza le distanze raggiungibili sono molto maggiori) e l'affidabilità del collegamento.

Un collegamento MIMO è descritto dal numero di antenne che utilizza: se N è il numero di antenne in trasmissione e M quelle in ricezione, sono possibili $N \times M$ configurazioni che, per 802.11n, vanno da "1x1" fino a "4x4". (Figura 12).

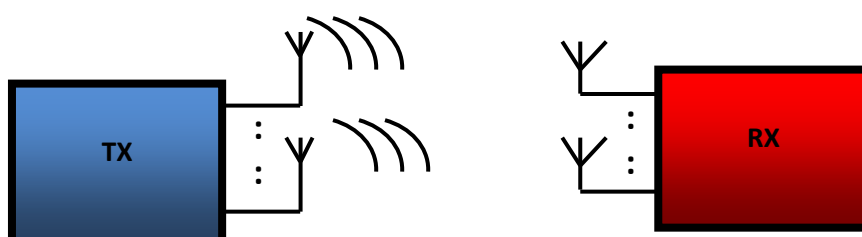


Figura 12: Rappresentazione grafica MIMO "2x2".

Il termine MIMO non definisce però il modo di utilizzare le antenne multiple, modo che varia molto a seconda dell'applicazione e del canale fisico che si ha a disposizione. Per questo motivo in IEEE 802.11n vengono utilizzate *tecniche di elaborazione del segnale* che coesistono in ogni sistema MIMO. Tali tecniche sono: *Space Time Block Coding (STBC)*, *Maximum Ratio Combining (MRC)*, *Spatial Division Multiplexing (SDM)* e *Transmit Beamforming (TxBF)*.

3.1.1.1 STBC (SPACE-TIME BLOCK CODING) and MRC (MAXIMUM RATIO COMBINING)

Entrambe queste tecniche hanno a che fare con la trasmissione e/o la ricezione di uno stesso flusso dati attraverso antenne diverse e consentono di sfruttare le varie versioni ricevute per migliorare l'affidabilità del trasferimento dei dati, il rapporto segnale/rumore (SNR, Signal Noise Rate) e per mitigare il fading.

Gli algoritmi spazio-temporali STBC vengono utilizzati quando ci sono molteplici antenne in trasmissione indipendentemente dal numero di antenne in ricezione (solitamente quando il numero di antenne in trasmissione è maggiore di quelle in ricezione). Vengono trasmesse diverse copie del flusso dati da diverse antenne e in tempi successivi, ridondanza spazio-temporale, supponendo che al ricevitore sia noto il codice originale.

Il destinatario sarà in grado di estrarre il flusso originario, in presenza di interferenze e distorsioni, riordinando ogni volta i dati acquisiti nella versione precedente e correggendo eventuali errori.

Mentre, MIMO implementa MRC quando in ricezione ci sono antenne multiple ed in trasmissione ci sono una o più antenne (generalmente quando il numero di antenne in ricezione supera il numero delle antenne in trasmissione). MRC è una funzione del ricevitore che gli permette di elaborare e combinare i segnali ricevuti in maniera indipendente per ricostruire una copia, il più possibile uguale, del flusso di dati trasmesso.

3.1.1.2 SDM (SPATIAL DIVISION MULTIPLEXING)

IEEE 802.11n raggiunge i suoi più significativi miglioramenti nel data rate attraverso l'uso combinato di MIMO e SDM. Mediante questa modulazione più informazioni possono essere codificate e suddivise su antenne diverse e trasmesse contemporaneamente sulla stessa banda, aumentando così la velocità di trasmissione. In questa situazione, le antenne riceventi vedono come campo risultante quello ottenuto dalla sovrapposizione di tutti i segnali in trasmissione, che tipicamente arriveranno da cammini diversi e saranno stati soggetti a riflessioni multiple differenti.

Se i singoli flussi giungono da cammini indipendenti, ossia da cammini sufficientemente distinti nello spazio, il ricevitore è in grado di ricostruire il flusso originario a partire da tutti i segnali presenti sulle antenne riceventi.

SDM è realizzabile quando il numero di antenne in ricezione è uguale o maggiore al numero di flussi di informazione trasmessi in parallelo. (Figura 13)

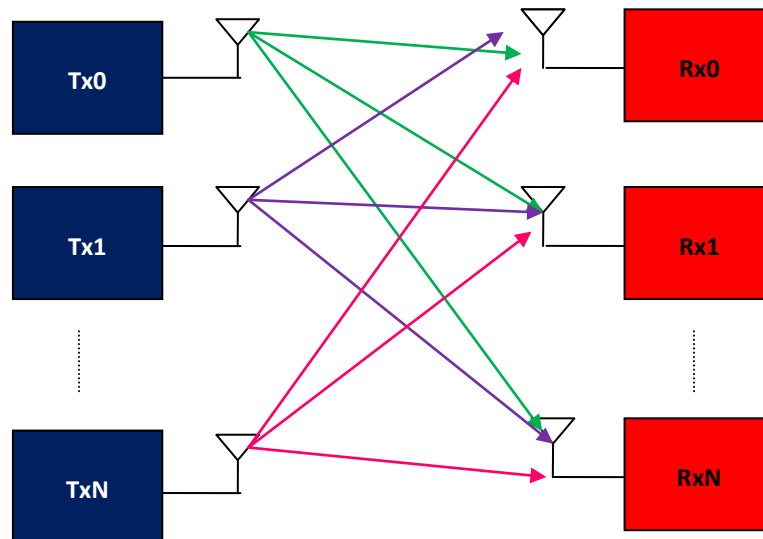


Figura 13: Esempio sistema SDM.

Tutti gli AP (Access Point) di 802.11n devono implementare almeno la configurazione MIMO “2x2” fino alla “4x4” che, rispettivamente, duplicano e quadruplicano il bit rate.

3.1.1.3 TRANSMIT BEAMFORMING (TxBF)

Questa tecnica ottimizza l’utilizzo della potenza. Consente di indirizzare la potenza irradiata non uniformemente nello spazio in direzioni preferenziali, ossia permette di focalizzare la potenza irradiata sull’antenna ricevente alla distanza voluta.

Beamforming sfrutta i fenomeni della riflessione del segnale e del multipath sia per migliorare la potenza del segnale ricevuto sia per sostenere data rate più elevati.

Riassumendo, MIMO utilizza STBC per antenne di trasmissione multiple, MRC per ricevitori multipli e SDM dove ci sono più percorsi paralleli, come mostrato in Figura 14.

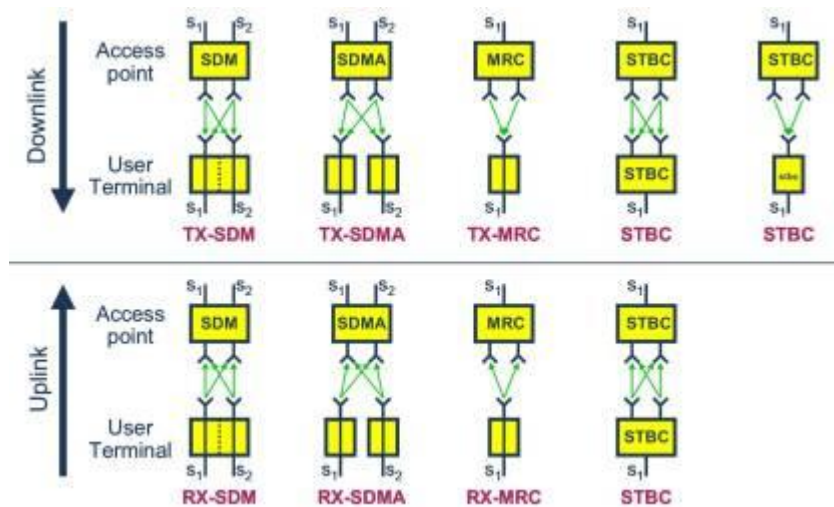


Figura 14: Rappresentazione grafica delle tecniche di elaborazione del segnale implementate da MIMO.

3.1.1.4 MIMO-OFDM

L'impiego della modulazione OFDM (multi-portante) congiuntamente alla tecnica MIMO permette di separare al ricevitore l'operazione di equalizzatore del canale, grazie a OFDM che elimina la distorsione introdotta dalla propagazione su cammini multipli, da quella di decodifica della trasmissione, perché la decodifica del segnale MIMO può essere effettuata separatamente su ciascuna portante.

3.1.2 CANALI DA 40 MHz: Channel Bonding

Lo standard IEEE 802.11n dà la possibilità di utilizzare canali di larghezza 40 MHz, oltre a canali ampi 20 MHz come negli standard precedenti, ottenuti utilizzando contemporaneamente due canali adiacenti ampi 20 MHz (*Channel Bonding*). Questo consente di raggiungere circa il doppio del bit rate, poiché di conseguenza aumenta il numero di informazioni trasmesse per unità di tempo, rispetto all'impiego di un canale singolo di ampiezza 20 MHz.

In 802.11n la specifica del raddoppio del canale è opzionale ma in pratica viene implementata da tutti i dispositivi 802.11n.

“*Channel Bonding*” è molto efficace nella banda ISM dei 5 GHz per il più elevato numero di canali rispetto alla banda ISM dei 2.4 GHz, la quale è “sovrappollata” e ha solo tre canali non sovrapposti, e per il più basso rischio di interferenze.

Altri contributi alla velocità sono ottenuti anche dall'incremento del numero di portanti della modulazione OFDM per la trasmissione del segnale, come mostrato in Figura 15.

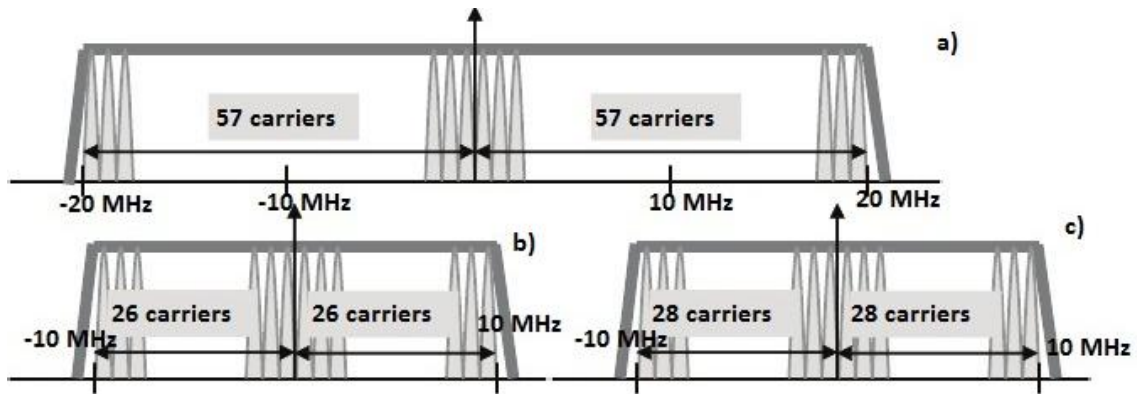


Figura 15: a) 114 subcarriers (108 utilizzabili) per un canale largo 40 MHz (**802.11n**); b) 52 subcarriers (48 utilizzabili) per un canale largo 20 MHz (**legacy 802.11a/g**); c) 56 subcarriers (52 utilizzabili) per un canale largo 20 MHz (**802.11n**).

Mentre 802.11 a/g specificano 8 data rate base (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps), 802.11n ne offre molti di più, come è mostrato in Tabella 4:

MCS Index	Type	Coding Rate	Spatial Streams	Data Rate (Mbps) with 20 MHz CH		Data Rate (Mbps) with 40 MHz CH	
				800 ns	400 ns (SGI)	800 ns	400 ns (SGI)
0	BPSK	1/2	1	6.50	7.20	13.50	15.00
1	QPSK	1/2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3/4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16-QAM	1/2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16-QAM	3/4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64-QAM	2/3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64-QAM	3/4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64-QAM	5/6	2	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1/2	2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1/2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3/4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16-QAM	1/2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16-QAM	3/4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64-QAM	2/3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64-QAM	3/4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64-QAM	5/6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1/2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...
31	64-QAM	5/6	4	260.00	288.90	540.00	600.00

Tabella 4: Lo standard 802.11n definisce “Modulation and Coding Scheme” (MCS): vengono illustrati i possibili data rate supportati da tale standard in base alle diverse modulazioni, coding rate, agli intervalli di guardia e al numero di flussi spaziali.

3.2 MIGLIORAMENTI LIVELLO MAC

3.2.1 PACKET AGGREGATION and BLOCK ACKNOWLEDGEMENT

Ogni frame trasmesso da un dispositivo 802.11 ha un overhead fisso dovuto al *Radio-Preamble*, *Radio-Header*, *MAC-Header* e dai *campi di controllo (ACK e FCS)*, come mostrato in Figura 16, che limitano l'effettivo throughput.

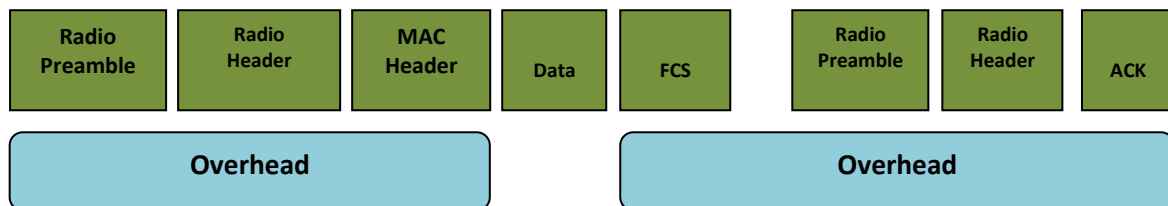


Figura 16: Overhead in 802.11.

Per ridurre questo overhead 802.11n ricorre alla tecnica del **"Frame Aggregation"**.

3.2.1.1 FRAME AGGREGATION

Con l'aggregazione al livello MAC, una stazione con uno o più frame da inviare può scegliere di trasmetterli come un unico frame.

Il frame risultante contiene un unico *Radio-Preamble* e un unico *Radio-Header*, riducendo così l'overhead e aumentando, di conseguenza, il payload, e poiché viene effettuata un'unica trasmissione vengono ridotti il tempo di contesa e di backoff sul mezzo wireless e il numero delle potenziali collisioni. (Figura 17)



Figura 17: Frame aggregation.

Ci sono due diversi meccanismi di aggregazione, noti come: **A-MSDU** (*Aggregation Mac Service Data Unit*) e **A-MPDU** (*Aggregation Mac Protocol Data Unit*). Il primo incrementa la massima dimensione di trasmissione da 2304 byte a quasi 8 kbyte, mentre il secondo arriva quasi a 64 kbyte.

Nella Figura 18, sono rappresentati gli scambi dei servizi offerti fra i vari livelli dello stack protocollare:

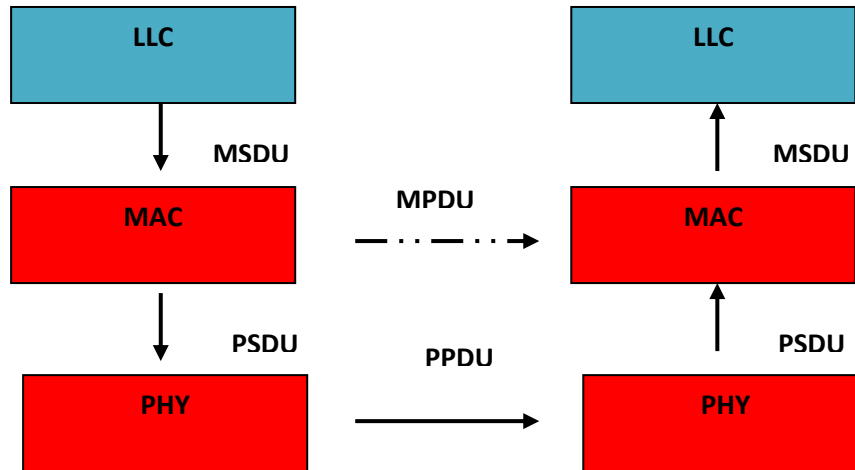


Figura 18: Scambio di servizi fra i vari livelli dello stack protocollare.

I servizi sono offerti tramite lo scambio di SDU, in particolare MSDU per il livello MAC, e lo scambio di informazione avviene mediante lo scambio di PDU che, come le SDU, prendono nomi diversi a seconda dei livelli interessati.

Nel formato A-MSDU, il più efficiente tra i due, i frame giunti dai livelli superiori vengono combinati ed elaborati dal livello MAC come una singola entità più grande che viene vista dal PHY come un unico MPDU, con un unico *MAC-Header* e un unico *FCS (Frame Check Sequence)*.

Ogni frame del flusso originario diventa un “subframe” dell’unico frame risultante dall’aggregazione con il proprio sub-Header contenente: indirizzo sorgente (Source Address, SA) e destinazione (Destination Address, DA) e lunghezza (Length). Ognuno di questi subframe deve possedere lo stesso livello QoS (Quality of Service), poiché non è possibile mescolare ad esempio frame vocali con frame best-effort, e stessa priorità, perché ritardare l’invio per aspettare frame da aggregare ne riduce i vantaggi. Inoltre, ogni subframe dell’A-MSDU deve essere inviato allo stesso ricevitore e la dimensione di ogni subframe MSDU può essere diversa. Importante, (Figura 19).

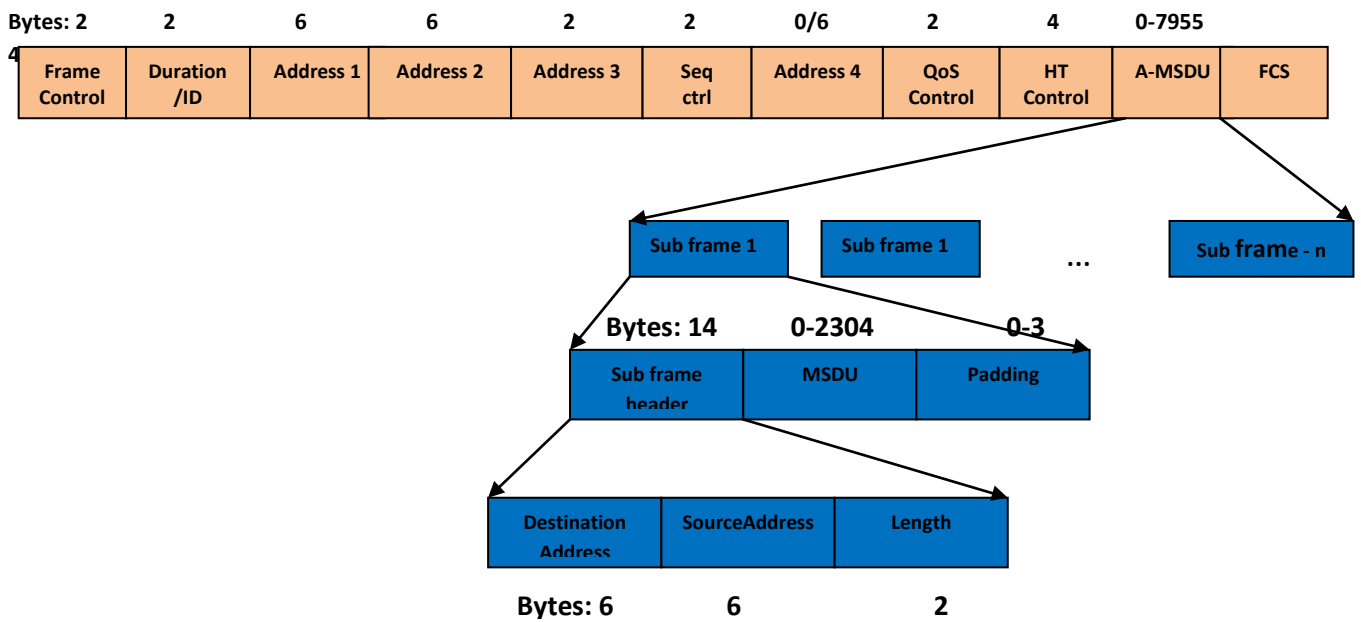


Figura 19: MSDU aggregation.

Come si vede dalla Figura 19, poiché i subframe non possiedono un proprio campo *checksum* non è possibile effettuare ritrasmissioni selettive dei frame corrotti.

L'aggregazione A-MSDU deve essere obbligatoriamente supportata al ricevitore dei dispositivi 802.11n.

Invece, il meccanismo di A-MPDU consiste nell'unire diversi MPDU sotto un unico *PHY-Header* (unico PPDU).

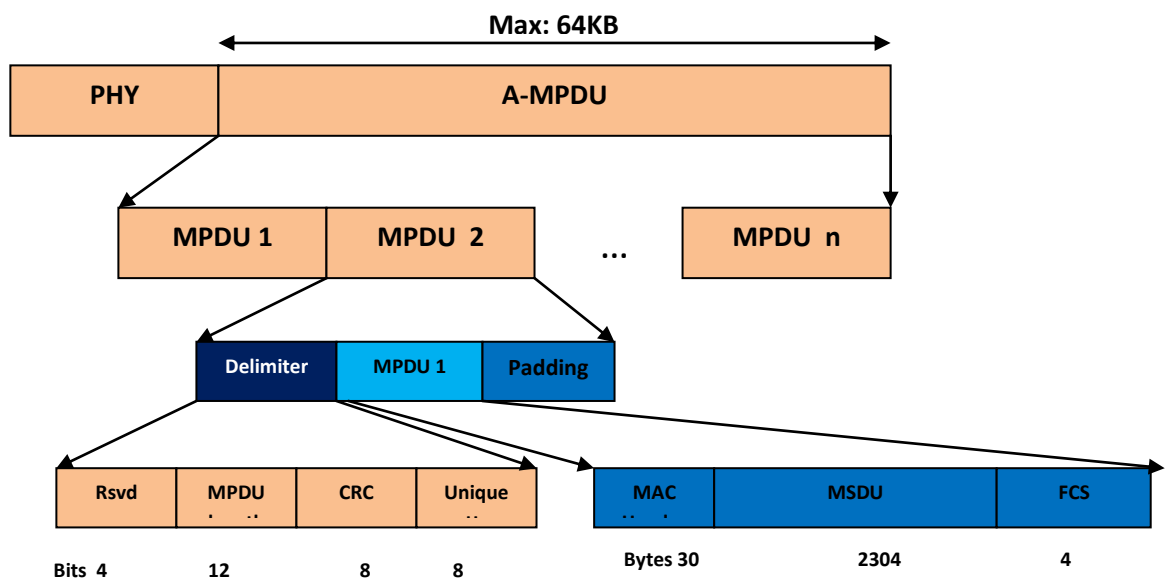


Figura 20: MPDU aggregation.

Come si vede dalla Figura 20, ogni MPDU è preceduto da un campo *Delimiter*, che contiene i campi: *Reserved*, *MPDU-Length*, *CRC* e *Unique Pattern*. In A-MPDU, l'AP può aggregare frame da sorgenti diverse destinati, però, allo stesso ricevitore con l'aiuto del BLOCK ACKNOWLEDGEMENT (BA).

In questo caso, visto che ogni singolo MPDU possiede un proprio campo *CRC*, sono possibili le ritrasmissioni dei soli subframe corrotti.

Entrambi gli schemi di aggregazione sono molto vantaggiosi: A-MSDU è molto efficace in condizioni di canale ideale ma, come vedremo, offre scarse prestazioni in ambienti rumorosi, mentre A-MPDU è robusto contro gli errori e la dimensione del frame aggregato arriva fino a 64 kbyte ma poiché accoglie un gran numero di frame potrebbe essere affetto da un ritardo maggiore, anche se l'aggregazione di più frame contribuisce ad aumentare il flusso, quindi bisogna arrivare ad un compromesso tra velocità e ritardo.

3.2.1.2 BLOCK ACKNOWLEDGEMENT (BA)

Riduce il numero di ACK che un ricevitore invia ad un trasmettitore per confermare la consegna del frame.

In precedenza per gli standard 802.11 ad ogni frame trasmesso doveva corrispondere una conferma per l'avvenuta ricezione.

Adesso, la funzione di BA consente ad un singolo ACK di confermare la ricezione di più frame, molto utile per trasmissioni ad alta velocità, migliorando l'efficienza del protocollo IEEE 802.11n e il throughput.

Per MSDU Aggregation non ci sono cambiamenti, infatti il frame risultante dall'aggregazione è un unico frame 802.11 e quindi richiede un unico ACK.

Mentre, ogni subframe del frame risultante dall'A-MPDU è un frame 802.11 e quindi a ciascuno dei singoli frame costituenti deve corrispondere un ACK. Per questo, alla MPDU Aggregation va in aiuto il BA; avvalendosi di tale meccanismo il destinatario raccoglie tutti gli ACK dei subframe in un unico "blocco" e lo invia al mittente.

Il meccanismo di BA permette di attuare la ritrasmissione selettiva dei soli subframe corrotti.

Rispetto ad A-MSDU, in ambienti con elevato error rate, A-MPDU risulta più efficace, in quanto il primo, in caso si verificassero errori, dovrebbe ritrasmettere l'intero frame aggregato mentre il secondo, grazie appunto alla ritrasmissione selettiva, dovrebbe ritrasmettere solo i frame danneggiati.

3.3 BENEFICI INTRODOTTI DA 802.11n

L'uso della tecnologia MIMO, che permette di ottenere un migliore SNR sul link radio, e il miglioramento del livello MAC si traduce in benefici in: velocità di trasmissione, affidabilità, copertura e throughput.

4. IEEE 802.11ac (Draft)

802.11ac è la prossima evoluzione del WiFi, si basa sul successo di IEEE 802.11n che è attualmente lo standard WLAN predominante sul mercato, e garantisce velocità wireless superiori a 1 Gbps.

Inoltre, offre notevoli vantaggi in termini di potenza ed efficienza dei collegamenti, grazie alla capacità di trasferire dati molto rapidamente, e garantisce la retrocompatibilità con 802.11a e 802.11n nella banda dei 5 GHz, implementando dove possibile le tecniche specifiche di 802.11n.

Questo capitolo descrive le nuove funzionalità introdotte dallo standard IEEE 802.11ac e ne riassume i vantaggi, in particolare, rispetto allo standard 802.11n; IEEE 802.11n ha introdotto notevoli benefici per le WLAN senza fili ma le nuove tendenze dei consumatori, sia privati che commerciali, hanno creato la domanda di una nuova serie di funzionalità alle quali cercherà di rispondere il progetto 802.11ac. (Tabella 5).

802.11ac Features	Customer Benefits
Wider Channel	Higher data rates – up to 1.3 Gbps per radio
Higher encoding density	Higher bit density per packet
Increased number of spatial streams	Higher data rates per AP/client link
Beamforming	Greater wireless AP/client link reliability
Multi-user MIMO	Greater AP/client capacity and efficient use of spectrum

Tabella 5: Nuove funzionalità previste dal progetto IEEE 802.11ac.

Lo standard 802.11ac, in via di approvazione, noto anche come VHT (Very High Throughput), presenta una serie di evoluzioni che mirano ad aumentare in maniera significativa la velocità di trasmissione, la robustezza e l'affidabilità delle reti WiFi. Queste innovazioni sono raggruppabili in due principali categorie: evoluzioni radio (banda di frequenze superiore, ampiezza dei canali ottimizzata, maggior numero di *spatial streams* ed evoluzioni a livello di modulazione) e l'implementazione della tecnica MIMO MULTI-UTENTE (MU-MIMO), che consente ad un unico AP (Access Point) di inviare contemporaneamente e sullo stesso spettro di frequenze frame multipli a multipli client, con *beamforming* ottimizzato.

4.1 EVOLUZIONI RADIO

4.1.1 Banda di frequenze superiore e maggiore ampiezza dei canali

Come detto in precedenza, un problema legato alle attuali reti WiFi consiste nel fatto che la banda ISM dei 2.4 GHz è congestionata da molti altri dispositivi, dai forni a microonde agli apparecchi bluetooth, provocando un rallentamento per tutti gli utenti.

Il progetto (draft) IEEE 802.11ac è destinato ad operare esclusivamente nella più ampia, e meno affollata, banda dell'intorno dei 5 GHz, aumentando notevolmente i data rate ed evitando gran parte delle interferenze a 2.4 GHz. Pur lavorando nella medesima banda 802.11ac offre, rispetto ad IEEE 802.11n, canali con larghezza di banda più estesa, e come è noto maggiore è l'ampiezza di banda dei canali più veloci sono le connessioni WiFi.

802.11ac supporta obbligatoriamente canali ampi 20, 40 e 80 MHz (contro i canali larghi 20 e 40 MHz dello standard 802.11n) e consente il supporto opzionale di canali con larghezza di banda di 160 MHz, raggiungendo in questo modo velocità di trasferimento superiori rispetto ad 802.11n, come mostrato in Tabella 6.

Bandwidth	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
# of Spatial Streams	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
1	86.7 Mbps	200 Mbps	433.3 Mbps	866.7 Mbps
2	173.3 Mbps	400 Mbps	866.7 Mbps	1733 Mbps
3	288.9 Mbps	600 Mbps	1300 Mbps	2340 Mbps
4	346.7 Mbps	800 Mbps	1733 Mbps	3466 Mbps
5	433.3 Mbps	1000 Mbps	2166 Mbps	4333 Mbps
6	577.8 Mbps	1200 Mbps	2340 Mbps	5200 Mbps
7	606.7 Mbps	1400 Mbps	3033 Mbps	6066.7 Mbps
8	693.3 Mbps	1600 Mbps	3466 Mbps	6933 Mbps

Tabella 6: Incremento dei data rate grazie a canali di larghezza maggiore e ad un maggior numero di streams spaziali.

I canali di larghezza 80 MHz e 160 MHz sono ottenuti mediante la tecnica del *Channel Bonding*, che consente di utilizzare contemporaneamente due (o più) canali distinti ampi, rispettivamente, 40 e 80 MHz. Il canale di 80 MHz sarà, pertanto, composto da due canali di ampiezza 40 MHz adiacenti non sovrapposti, mentre, il canale largo 160 MHz sarà costituito da due canali di 80 MHz che possono essere adiacenti (contigui) o non contigui.

Grazie a canali più ampi, si raggiungono data rate più elevati ed un conseguente incremento del throughput, ma ciò comporta una riduzione del numero di canali non sovrapposti nella banda dei 5 GHz. (Figura 21)

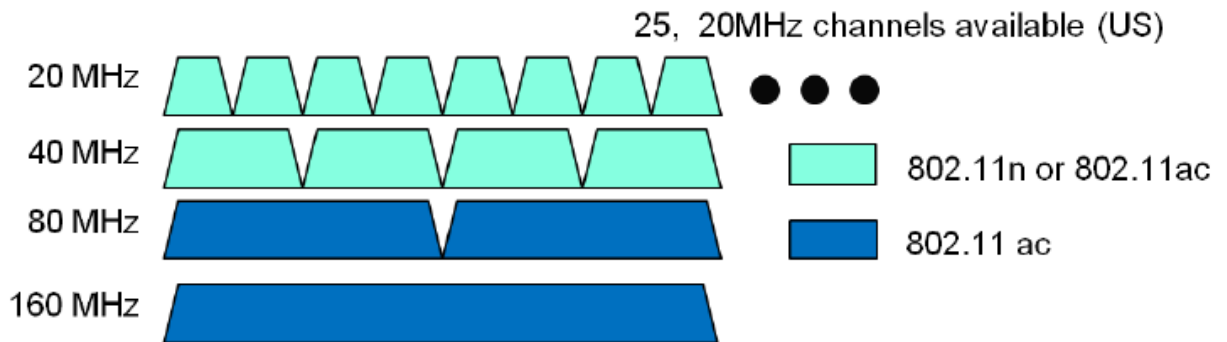


Figura 21: Canali di larghezza di banda più ampia in 802.11ac. (5 GHz)

4.1.2 Evoluzione a livello di modulazione e maggior numero di spatial streams

Per la modulazione dei bit da inviare sul mezzo trasmissivo lo standard 802.11ac si avvale, opzionalmente, della tecnica 256-QAM, oltre alle obbligatorie OFDM, BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM, indispensabili per conseguire la retrocompatibilità con IEEE 802.11a e IEEE 802.11n.

Fino ad ora, con 802.11n il più alto ordine per la modulazione realizzato per le LAN senza fili è stato 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation); ora, 802.11ac sposta lo schema di modulazione ad un ordine più alto, 256-QAM, con conseguente aumento dei data rate del 33% rispetto a 802.11n.

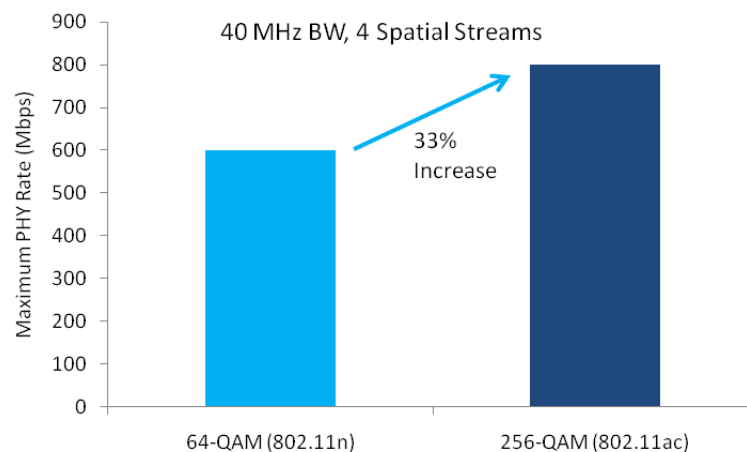


Figura 22: Incremento dei data rate dovuti alla modulazione 256-QAM in 802.11ac.

Come si vede dalla Figura 22, il livello PHY con canali ampi 40 MHz e 4 flussi spaziali raggiunge velocità di trasmissione massime di 600 Mbps con la modulazione 64-QAM contro gli 800 Mbps ottenibili con la modulazione 256-QAM; questo incremento avviene perché la modulazione 256-QAM codifica un maggior numero di bit per simbolo, precisamente 8, rispetto alla 64-QAM che ne codifica 6. Tuttavia, occorre notare che per la modulazione 256-QAM è richiesto un maggior rapporto segnale/rumore (SNR) rispetto alla modulazione 64-QAM perché i simboli della costellazione, come mostrato in Figura 23, sono più vicini l'un l'altro e per questo più sensibili al rumore.

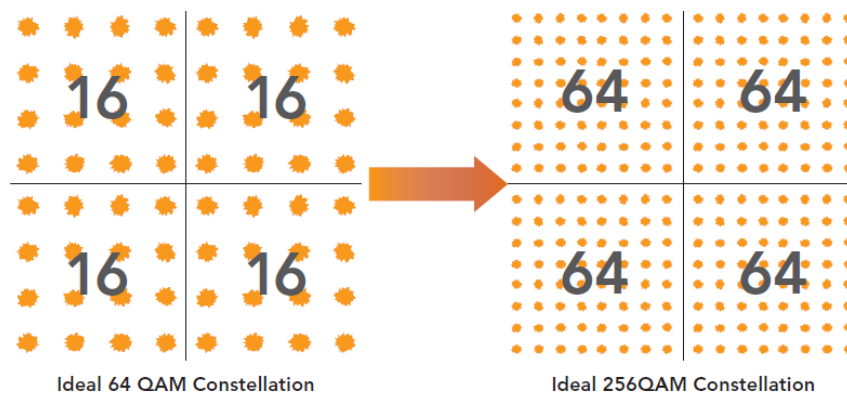


Figura 23: Costellazioni delle modulazioni 64-QAM e 256-QAM a confronto.

Inoltre, lo standard 802.11ac permette di supportare fino ad *8 spatial streams* contro un massimo di 4 per IEEE 802.11n. Il supporto per più di un flusso spaziale è facoltativo, tuttavia il maggior numero di spatial streams acquista, come vedremo, una grande utilità in combinazione con la nuova tecnica MU-MIMO introdotta da IEEE 802.11ac.

MU-MIMO, infatti, può supportare un massimo di 8 streaming spaziali in modalità MIMO singolo-utente (SU-MIMO) e multi-utente fino ad un massimo di 4 streaming spaziali per stazione in modalità MIMO multi-utente, consentendo di raddoppiare il throughput totale di una rete 802.11ac rispetto ad una rete 802.11n.

4.2 MU-MIMO (Multiple-User Multiple-Input Multiple-Output)

MU-MIMO è una funzionalità aggiunta del progetto 802.11ac che migliora la velocità di trasmissione multi-stazione dell'*access point*, consentendo ad un AP di servire flussi di dati indipendenti contemporaneamente a più client: fino ad un massimo di 4 stazioni client (STAs) diverse ognuna con due antenne riceventi servite da un AP con 8 antenne; senza MU-MIMO, l'AP dovrebbe multiplexare le 4 STAs e servirne una alla volta, riducendo così il throughput di un fattore 4.

Questa tecnica è fondamentale per permettere alle reti 802.11ac di raggiungere data rate dell'ordine del Gigabit.

Il funzionamento di MU-MIMO è simile a quello della tecnica MIMO dello standard 802.11n, che trasmette fino ad un massimo di 4 flussi ad un dispositivo alla volta, tranne per il fatto che le trasmissioni avvengono su antenne di *diversi dispositivi riceventi*: è definita da un massimo di 8 flussi spaziali divisi su un massimo di 4 client diversi e consente ad un terminale di trasmettere o ricevere segnali da e verso più utenti nella stessa banda di frequenza simultaneamente.

Quindi, si deduce che, ad esempio, in una trasmissione MIMO singolo-utente per trasmettere 3 flussi spaziali un utente deve avere 3 antenne in ricezione, mentre in MU-MIMO 3 flussi spaziali possono essere inoltrati contemporaneamente a 3 utenti diversi a singola antenna riducendo drasticamente la complessità di una rete domestica.

Nella Figura 24, vengono messe a confronto le due tecniche, MIMO e MU-MIMO:

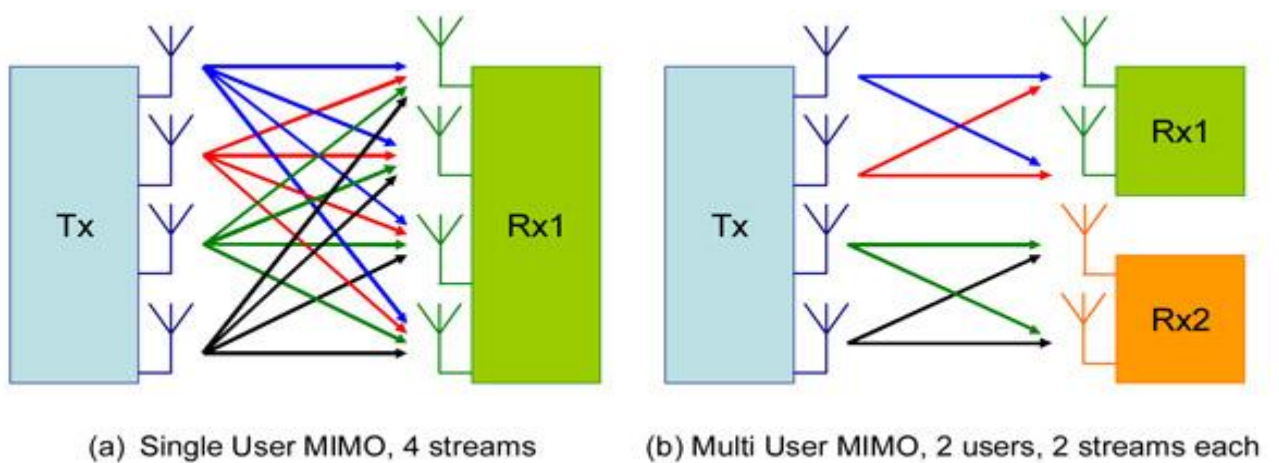


Figura 24: MIMO vs MU-MIMO.

Nella Tabella 7 vengono elencate le possibili configurazioni delle antenne trasmettenti e riceventi in 802.11ac.

Configuration	Typical Client (STA) Form Factor	PHY Link Rate	Aggregate Capacity
1-antenna AP, 1-antenna STA, 80 MHz	Mobile Phone Mobile Entertainment Device	433 Mbit/s	433 Mbit/s
2-antenna AP, 2-antenna STA, 80 MHz	Tablet, Laptop, Networked Game Console	867 Mbit/s	867 Mbit/s
1-antenna AP, 1-antenna STA, 160 MHz	Mobile Phone Mobile Entertainment Device	867 Mbit/s	867 Mbit/s
2-antenna AP, 2-antenna STA, 160 MHz	Tablet, Laptop, Networked Game Console	1.73 Gbit/s	1.73 Gbit/s
4-antenna AP, 4 1-antenna STAs, 160 MHz (MU-MIMO)	Mobile Phone Mobile Entertainment Device	867 Mbit/s to each STA	3.47 Gbit/s
8-antenna AP, 160 MHz (MU-MIMO) <ul style="list-style-type: none"> • 1 4-antenna STA • 1 2-antenna STA • 2 1-antenna STAs 	TV, Set-Top Box, Tablet, Laptop, Networked Game Console, Mobile Phone	3.47 Gbit/s to 4-antenna STA 1.73 Gbit/s to 2-antenna STA 867 Mbit/s to 1-antenna STA	6.93 Gbit/s
8-antenna AP, 4 2-antenna STAs, 160 MHz (MU-MIMO)	TV, Set-Top Box, Tablet, Laptop, PC	1.73 Gbit/s to each STA	6.93 Gbit/s

Tabella 7: Esempi di configurazioni in 802.11ac (assumendo la modulazione 256-QAM per tutte le velocità, rate 5/6).

La tecnica MU-MIMO richiede un'ottimizzazione della tecnologia *beamforming*, già implementata in IEEE 802.11n, ossia la capacità di concentrare l'energia del segnale in una data direzione che rende 802.11ac più robusto alle interferenze e, di conseguenza, più affidabile rispetto ai suoi predecessori.

Con le migliorie apportate al *beamforming*, applicabile a tutti i dispositivi con antenne multiple, i flussi in cui viene suddiviso il segnale, che giungono al ricevitore seguendo percorsi differenti, vengono gestiti dai trasmettitori e mantenuti in fase, per permettere un accoppiamento costruttivo, per generare un segnale più forte al ricevitore: le antenne multiple trasmettenti concentrano e combinano in maniera ottimale le energie dei flussi del segnale da trasmettere verso le antenne del dispositivo di destinazione invece di disperdere energia in tutte le direzioni. Senza la tecnologia del *beamforming* le onde, a causa del *multipath fading*, arriverebbero al ricevitore sfasate annullandosi le une con le altre.

802.11ac definisce un proprio metodo di *beamforming*: l'AP trasmette un segnale (pacchetto) speciale, detto "sounding", contenente l'indirizzo dell'AP e quello dei destinatari finali, al lato ricevente per fare una stima del canale, tenendo conto di tutte le imperfezioni presenti tra trasmettitore e ricevitore. Una volta eseguita la valutazione del canale le antenne multiple riceventi la renderanno nota al lato trasmettente (*feedback*).

Più chiaramente, ogni destinatario "misura" il collegamento dall'AP a se stesso permettendo, così, al trasmettitore di orientare con precisione il fascio al ricevitore al quale è destinato evitando percorsi inefficienti, aumentando, di conseguenza, l'affidabilità del link tra AP e STA (client), e massimizzando capacità (portata) e copertura del collegamento sopprimendo le interferenze a livello di singolo ricevitore causate dagli streaming non destinati ad un determinato client. Ogni client, pertanto, riceve i propri dati senza le interferenze provenienti dalle trasmissioni indirizzate contemporaneamente ad altri client.

4.3 Conclusioni

La popolazione commerciale di oggi sta diventando sempre più *mobile* (laptop, tablet, smartphone) e la sfida di 802.11ac è quella di soddisfare le nuove esigenze funzionali del mercato delle prossime generazioni di wireless. Lo standard 802.11ac si prospetta di rispondere a queste esigenze migliorando le connessioni dei dispositivi mobili rendendole più rapide ed affidabili.

L'approvazione di questo standard, oltre ad offrire *data rate superiori*, *migliorerà il throughput* sia del singolo collegamento, utilizzando più larghezza di banda e la modulazione 256-QAM, sia della rete, utilizzando MU-MIMO, garantendo un supporto migliore per le applicazioni mobili, sia video che audio. Inoltre, operando esclusivamente nella meno affollata banda ISM dell'intorno dei 5 GHz e grazie al nuovo metodo di *beamforming* assicurerà: una *maggiore affidabilità*, una *maggior copertura*, estendendo il range di operabilità dell'AP evitando punti morti ed aree con copertura scadente, ed una *maggior capacità*, supportando un elevato numero di dispositivi wireless in ambienti dove la densità di questi è in continuo aumento.

ACRONIMI

WLAN: Wireless Local Area Network
IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISO: International Organization for Standardization
PLCP: Physical Layer Convergence Procedure
PMD: Physical Medium Dependent
MAC: Medium Access Control
PHY: Physical Layer
DLL: Data Link Layer
RF: Radio Frequency
CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
AP: Access Point
ACK: Acknowledgement
DCF: Distributed Coordination Function
DIFS: Distributed InterFrame Space
SIFS: Short InterFrame Space
PCF: Point Coordination Function
PC: Point Coordinator
SS: Spread Spectrum
FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum
DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
DBPSK: Differential Binary Phase Shift Keying
DQPSK: Differential Quaternary Phase Shift Keying
CCK: Complementary Code Keying
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ISM: Industrial, Scientific and Medical
ITU: International Telecommunication Union
ERP: Extended Rate Physicals
PBCC: Packet Binary Convolution Coding
SDU: Service Data Unit
PDU: Protocol Data Unit
PSDU: PLCP Service Data Unit
SFD: Start Frame Delimiter
RTS/CTS: Request to Send/Clear to Send
CTS-to-SELF: Clear to Send to Self
MIMO: Multiple Input Multiple Output
LOS: Line Of Sight
STBC: Space-Time Block Coding
MRC: Maximum Ratio Combining

SDM: Spatial Division Multiplexing
TxBF: Transmit Beamforming
FCS: Frame Check Sequence
A-MSDU: Aggregation Mac Service Data Unit
A-MPDU: Aggregation Mac Protocol Data Unit
SA: Source Address
DA: Destination Address
QoS: Quality of Service
CRC: Cyclic Redundancy Check
BA: Block Acknowledgement
VHT: Very High Throughput
SU-MIMO: Single-User Multiple-Input Multiple-Output
MU-MIMO: Multiple-User Multiple-Input Multiple-Output
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
STA: Station

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

1. Documenti ufficiali IEEE standard per 802.11g e 802.11n.
2. "Reti Wi-Fi" di Shelly Brisbin.
3. Capitolo 1 di "Emerging wireless LANs, wireless PANs, and wireless MANs (IEEE 802.11, IEEE 802.15, 802.16 wireless standard family)" di Yang Xiao and Yi Pan.
4. "Il libro del wireless" di John Ross.
5. "Reti di calcolatori" di Andrew S. Tanenbaum.
6. White Paper "IEEE 802.11g. New draft standard clarifies future of Wireless LAN", Texas Instruments.
7. "The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs", IEEE Network (May/June 2005), University of Aegean.
8. White Paper "IEEE 802.11g explained" di Jim Zyren (December 2001).
9. "Designed for speed network infrastructure in an 802.11n world", Peter Thornycroft, Aruba Networks.
10. White Paper for 802.11n.
www.enterasys.com/company/literature/802.11n%20whitepaper_EN.pdf
11. "IEEE 802.11n Frame Aggregation mechanism for next generation high-throughput WLANs".
dsp.space.brunel.ac.uk/bitstream/2438/2547/1/IEEE%20802.11n%20MAC%20frame%20aggregation%20mechanisms%20for%20next-generation%20high-throughput%20WLANs%20%5Bmedium%20access%20control%20protocols%20for%20wireless%20LANs%20%5D.pdf
12. "Dietro le quinte del MIMO", Bruno Melis, Paolo Priotti e Alfredo Ruscitto.
www.comlab.uniroma3.it/telecinfo/MIMO_tilab.pdf
13. "A frame aggregation scheduler for IEEE 802.11n".
comm.au-kbc.org/Docs/papers/A_Frame_Aggregation_Scheduler_for_IEEE_802_11n.pdf
14. White Paper "802.11n Primer", AirMagnet (August 05, 2008).
15. Bitcricket White Paper, "Inside 802.11n Wireless LANs – Practical insides and Analysis" by J. Scott Haugdahl (December 2007).
16. Meraki White Paper, "802.11n Technology" (February 2011).
17. White Paper "New aspect on Wireless Communication Networks", International Journal of Communications (2009).
18. "Wi-Fi Certified 802.11n draft 2.0: Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi Networks", Wi-Fi Alliance (June 2007).
19. White Paper "802.11ac Technology Introduction", Rohde and Schwarz.
www2.rohde-schwarz.com/file_18206/1MA192_7e.pdf
20. CISCO White Paper "802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi". (August 2012)
www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps11983/white_paper_c11-713103.html#wp9000371
21. White Paper "Understanding the 802.11ac Wi-Fi Standard", Rich Watson (September 2012).
22. White Paper "IEEE 802.11ac: What Does it Mean for Test?", Litepoint (June 2012).
23. "Breaking the Gigabit-per-Second barrier with 802.11ac", Richard Van Nee, Qualcomm Inc.
24. White Paper "Understanding IEEE 802.11ac VHT Wireless", Aeroflex (July 2012).
25. White Paper "An introduction to 802.11ac", Quantenna Communications (September 2011).
26. "IEEE 802.11ac - Wi-Fi for the Mobile and Video Generation", Broadcom Corporation (January 2012).

