



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Schemi di Modulazione per Reti 5G

Relatore: Prof. Roberto Corvaja

Laureando: Daniel Biasin
Matricola: 1195729

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Data di laurea: 29/09/2023

Abstract

Il seguente elaborato contiene una prima parte in cui si svolge una breve presentazione dell'evoluzione delle reti mobili; soffermandosi successivamente sulla rete 5G e sugli aspetti di questa tecnologia che hanno imposto la necessità di questo studio. Infatti l'obiettivo principale di questa trattazione risiede nell'esposizione e nella successiva analisi di nuovi schemi di modulazione per le reti 5G, per soddisfare i requisiti appena citati. In particolare ci soffermeremo sulla applicabilità di ogni singolo schema di modulazione con lo scopo di trarre conclusioni sul rendimento del proprio utilizzo, svolgendo un'analisi sulle *efficienze spettrali*, sul *Bit Error Ratio* (BER) ed anche sul *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Al termine si procede con una rapida nota informativa su quelle che saranno le reti del futuro e le necessità tecniche e sociali che porteranno allo sviluppo di nuove tecnologie.

Indice

1	Introduzione	1
2	Evoluzione delle Generazioni Passate	3
2.1	Albori delle reti mobili - 0G	4
2.2	I primi passi delle reti mobili - 1G	4
2.3	L'inizio della tecnologia EDGE - 2G	5
2.3.1	La generazione 2G	5
2.3.2	Le generazioni 2.5G e 2.75G	6
2.4	La prima svolta - 3G	8
2.5	La tecnologia <i>MAGIC</i> - 4G	9
3	Le Reti 5G	11
3.1	Scopi e obiettivi delle Reti 5G	11
3.2	La struttura della Rete 5G	13
3.2.1	Radio Access Network (RAN)	13
3.2.2	Core Network (5GC)	13
3.2.3	Network Slicing	13
3.2.4	Network Function Virtualization (NVF)	14
3.2.5	Base Station delle reti 5G	14
4	Schemi di Modulazione delle Reti 5G	17
4.1	OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing	17
4.2	FBMC: Filter Bank Multi-Carrier	18
4.2.1	Filtraggio delle sotto-portanti nella modulazione FBMC	19
4.2.2	Modulazione Offset-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	20
4.2.3	Caratteristiche importanti della FBMC	20
4.3	UFMC: Universal Filtered Multi-Carrier	21
4.3.1	Caratteristiche principali della modulazione UFMC	21
4.3.2	Schema di trasmissione della modulazione UFMC	21
4.3.3	Caratteristiche importanti della UFMC	22
4.4	GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing	23
4.4.1	La schema di modulazione GFDM	23
4.4.2	Caratteristiche importanti della GFDM	24

4.5	F-OFDM: Filtered-OFDM	24
4.5.1	Implementazione di uno schema F-OFDM	25
4.5.2	Considerazioni finali sullo schema F-OFDM	25
5	Confronto tra Schemi di Modulazione 5G	27
5.1	Confronto tra UPMC e OFDM	27
5.2	Confronto tra FBMC e OFDM	29
5.3	Confronto tra F-OFDM e OFDM	30
6	Conclusioni	33
6.1	Considerazioni finali sugli schemi di modulazione analizzati	33
6.1.1	Efficienza spettrale - Analisi del PAPR	33
6.1.2	Bit-Error-Ratio (BER)	34
6.1.3	Signal-to-Noise Ration (SNR)	34
6.2	Le reti mobili del futuro	36
6.2.1	Intelligent Life	36
6.2.2	Intelligent Production	36
6.2.3	Intelligent Society	37
6.2.4	Possibili parametri necessari per le reti 6G	38

Elenco delle figure

1.1	Esempi di reti interconnesse [1]	1
2.1	Rappresentazione dell'evoluzione delle reti mobili [2]	3
2.2	Tabella dei parametri della rete 1G [2]	5
2.3	Tabella dei parametri della rete 2G [2]	6
2.4	Schema generico di funzionamento delle reti 2G [2]	6
2.5	Tabella dei parametri della rete 2.5G [2]	7
2.6	Tabella riassuntiva dell'evoluzione delle reti 2G [2]	7
2.7	Tabella comparativa tra le generazioni 2G e 3G [2]	8
2.8	Tabella riassuntiva dell'evoluzione delle reti [2]	9
3.1	Rappresentazione generica di un sistema di rete 5G [3]	11
3.2	Esempi di tessuti sociali e industriali fornite dalla rete 5G [3]	12
3.3	Infrastrutture di rete per la tecnologia 5G [3]	14
3.4	Grafici inerenti alle caratteristiche delle <i>Base Station</i> [3]	15
4.1	Diagramma a blocchi sistema OFDM trasmettitore - ricevitore [4]	18
4.2	Diagramma a blocchi del trasmettitore per modulazione FBMC [5]	18
4.3	Diagramma a blocchi del ricevitore per modulazione FBMC [5]	19
4.4	Tabella riassuntiva filtro <i>PHYDYAS</i> [6]	19
4.5	Diagramma a blocchi del trasmettitore per modulazione FBMC [7]	21
4.6	Diagramma a blocchi del ricevitore per modulazione FBMC [7]	22
4.7	Diagramma a blocchi del ricetrasmittitore dello schema GFDM [8]	23
4.8	Diagramma a blocchi del trasmettitore dello schema F-OFDM [5]	25
4.9	Diagramma a blocchi del ricevitore dello schema F-OFDM [5]	25
5.1	Tabella dei parametri relativi allo schema UFMC [7]	27
5.2	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema UFMC [7]	28
5.3	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema OFDM [7]	28
5.4	Grafico della costellazione dei simboli dello schema UFMC [7]	28
5.5	Tabella dei parametri dello schema FBMC [9]	29
5.6	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema FBMC [9]	29
5.7	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema OFDM [9]	29
5.8	Tabella dei parametri dello schema F-OFDM [5]	30
5.9	Grafico della risposta impulsiva del filtro <i>sinc</i> [5]	31

5.10	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema F-OFDM [5]	. . .	32
5.11	Grafico della <i>Power Spectral Density</i> dello schema OFDM [5]	. . . . .	32
5.12	Grafico della costellazione dei simboli dello schema F-OFDM [5]	. . .	32
6.1	Tabella riassuntiva dei PAPR rilevati dalle simulazioni	. . . . .	34
6.2	Tabella riassuntiva dei BER rilevati dalle simulazioni	. . . . .	34
6.3	Tabella riassuntiva dei SNR rilevati dalle simulazioni	. . . . .	35
6.4	Possibili scenari di utilizzo delle reti 6G [10]	. . . . .	37
6.5	Confronto parametri tra reti 5G e le future reti 6G [10]	. . . . .	38

Capitolo 1

Introduzione

Il settore delle telecomunicazioni nato e sviluppatosi in seguito alla *Seconda Guerra Mondiale*, durante la cosiddetta *Terza Rivoluzione Industriale* ha sempre avuto il compito di mettere in comunicazione le persone. Sin dagli albori della radio, passando successivamente alla nascita della televisione, giungendo infine allo sviluppo delle tecnologie di rete mobile, le quali hanno permesso una prevalente iterazione tra gli esseri umani. In particolare l'aspetto di maggior interesse nella stesura di questo elaborato risiede nella nuova generazione di rete mobile, ovvero la tecnologia 5G, in particolare svolgeremo un'attenta valutazione dei nuovi schemi di modulazione che possono essere implementati con lo scopo di soddisfare le esigenze del mercato; vale a dire incremento generale delle prestazioni, legate a *data rate*, *latenza* e necessità di fornire servizi a un numero elevato di dispositivi, diversificati tra loro.

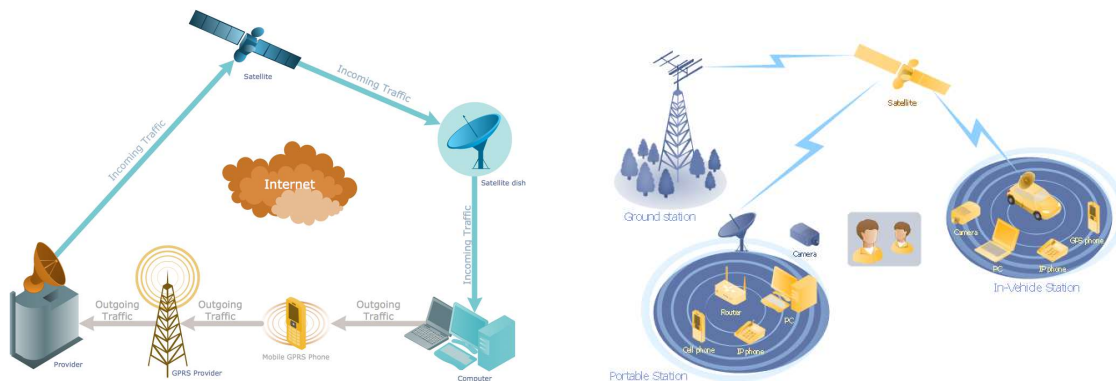


Figura 1.1: Esempi di reti interconnesse [1]

Capitolo 2

Evoluzione delle Generazioni Passate

Nel seguente capitolo procederemo con una rapida analisi dell'evoluzione delle reti mobili che è avvenuta nelle ultime decadi. Infatti, nel corso degli ultimi 50 anni si sono presentate svariate tecnologie, le quali sono state raggruppate in cinque principali generazioni.

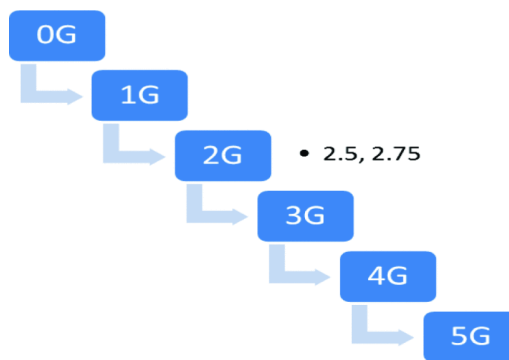


Figura 2.1: Rappresentazione dell'evoluzione delle reti mobili [2]

Agli albori, lo scopo principale delle reti mobili era quello di permettere agli utenti di comunicare senza l'utilizzo di dispositivi fissi, permettendo quindi una piena mobilità nonostante vi fosse la necessità di contattare un altro utente, anche se locato dalla parte opposta dell'emisfero terrestre. Al giorno d'oggi invece questa tecnologia viene sfruttata anche per la trasmissione di vari genere di dati, i quali spaziano tra immagini, video, testo, tabelle, ecc. Il principio fisico su cui si basa tutt'ora questo metodo di trasmissione sono le onde elettromagnetiche (*EM Waves*), le quali trasportano un segnale contenente *informazione*. Lo studio di una tecnologia che potesse sostituire i cablaggi fisici per le comunicazioni è stata sperimentata in vari laboratori durante gli anni *sessanta* e *settanta* e sin da allora ha presentato numerosi punti di forza, rispetto alle reti cablate: comunicazioni a lunga distanza (anche zone

remote), costi ridotti, resistenza alle intemperie, maggiore efficienza, flessibilità ed affidabilità della connessione di rete.

2.1 Albori delle reti mobili - 0G

La generazione *zero* è da considerarsi un primo tentativo di telefonia mobile che è stato ingegnerizzato in seguito alla seconda guerra mondiale, si basava su tecnologie di trasmissione analogiche, tra le quali PTT ¹, MTS ² e IMTS ³. La comunicazione tra due utenti doveva essere attuata fisicamente da una persona ed inoltre solo con l'avvento della generazione 0.5, si arrivò ad avere un capacità di canale maggiorata.

2.2 I primi passi delle reti mobili - 1G

La prima vera generazione di reti mobili è stata sviluppata negli anni *ottanta* e si basava principalmente su una modulazione analogica denominata FDMA (*Frequency Division Multiple Access*); il massimo esponente dello schema appena citato è AMPS (*Advance Mobile Phone System*), sviluppato da *Bell Labs* e *Motorola*. Questa generazione presentava un grande balzo in avanti in termini di innovazione tecnologica, adoperava infatti la tecnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*) per la suddivisione delle bande dedicate alla telefonia.

Presentava però alcune persistenti problematiche legate all'utilizzo di segnali analogici, ovvero notevoli problemi di interferenze, nessuna sicurezza nelle trasmissioni e spesso risultava essere inaffidabile nella stabilità della connessione; importante segnalare come i primi dispositivi mobili fossero davvero molto ingombranti, soprattutto se paragonati a quelli odierni.

Nella pagina seguente (Fig.2.2) è possibile osservare una tabella contenente tutte le tecnologie implementato nella prima generazione di reti mobili.

¹*PTT: Push To Talk*

²*MTS: Mobile Telephone System*

³*IMTS: Improved Mobile Telephone System*

Sr.no.	PARAMETER	1G
1.	Multiplexing	FDMA
2.	Standard	AMPS
3.	Switching	Circuit
4.	Service	Voice calls
5.	Main Network	PSTN

Figura 2.2: Tabella dei parametri della rete 1G [2]

2.3 L'inizio della tecnologia EDGE - 2G

Passiamo ora in rassegna la seconda generazione, la quale ha portato con se importanti modifiche strutturali. Possiamo suddividere questa generazione in due differenti sotto-generazioni, nominate 2.5G e 2.75G, meglio conosciute rispettivamente come GPRS ⁴ e EDGE ⁵, tutt'ora presenti e funzionanti.

2.3.1 La generazione 2G

I punti cruciali di questo schema di rete mobile, rilasciato pubblicamente all'inizio degli anni *novanta*, risiedono nelle nuove tecnologie digitali implementate, in particolare lo schema GSM ⁶ che include le tecnologie TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*). Quest'ultimo schema di *multiplexing* consente la trasmissione parallela di molteplici segnali sullo stesso canale ottimizzando il recapito dei dati; vi è quindi un aumento dell'efficienza spettrale. Con l'ausilio delle tecnologie appena riportate e un opportuno schema di trasmissione ben definito (Fig.2.4) si è data la possibilità agli utenti di usufruire di nuovi applicativi, tra cui figurano SMS ⁷, MMS ⁸ ed inoltre la possibilità di svolgere la navigazione *internet* direttamente dal loro dispositivo mobile, senza l'ausilio di computer, i quali risultavano essere l'unico metodo di accesso sino all'avvento di questa generazione. Alla base degli applicativi appena citati vi sono alcune nuove implementazioni digitali adoperate sia nella codifica di canale che lato sicurezza della trasmissione stessa. L'utilizzo della tecnologia CODEC ⁹ per la compressione e codifica dei dati permettono una riduzione del rumore ed un conseguente aumento

⁴GPRS: *General Packet Radio Service*

⁵EDGE: *Enhanced Data rates for GSM Evolution*

⁶GSM: *Global System for Mobile communications*

⁷SMS: *Short Message Service*

⁸MMS: *Multimedia Message Service*

⁹CODEC: *abbreviazione di coder-decoder o compression-decompression*

dell'efficienza energetica e spettrale come già citato in precedenza; questi aspetti hanno contribuito ad aumentare la qualità dei servizi forniti dalla rete GSM.

Sr. no	REGION	USTS-54	EUROP EGSM	JAPAN PDC	USI-95
1.	Modulation	DQPSK	GMSK	DQPSK	QPSK/OQPSK
2.	Forward Channel	869-894MHz	935-960MHz	810-826MHz	869-894MHz
3.	Reverse Channel	824-849MHz	890-915MHz	940-950MHz	824-849MHz
4.	Channel Spacing	30KHz	200KHz	25KHz	1.250KHz
5.	Data rate	40.6Kbps	270.833Kbps	42Kbps	1.2288Kbps

Figura 2.3: Tabella dei parametri della rete 2G [2]

Nonostante queste novità applicative, la rete 2G presenta comunque dei limiti in termini di prestazioni, infatti quest'ultima risulta essere non ottimali per la navigazione *internet* e nemmeno per le applicazioni di messaggistica.

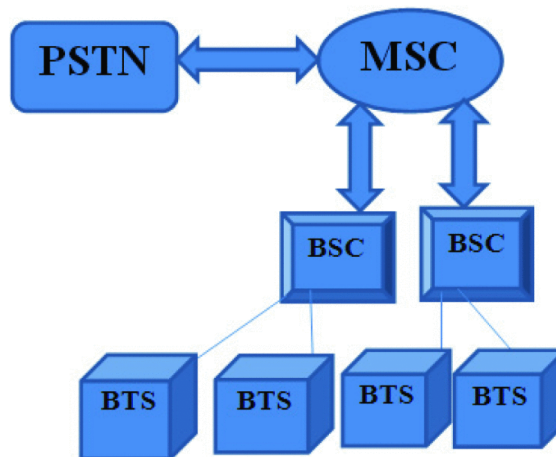


Figura 2.4: Schema generico di funzionamento delle reti 2G [2]

2.3.2 Le generazioni 2.5G e 2.75G

Queste evoluzioni della generazione 2G comportano miglioramenti dei servizi SMS, MMS e navigazione *internet* con l'ausilio di una raffinazione dello schema CDMA,

grazie al quale ogni singolo canale può fornire il servizio a 64 diversi utenti, aumentando quindi la capacità totale del canale di trasmissione.

Sr.no.	Region	America	Europe	Japan
1.	Parameter	AMPS (Advance Mobile Phone System).	ETACS (Europe Total Access Communication System).	NTT (Nippon Telephone and Telegraph).
4.	Forward Channel	869-894MHz	935-960MHz	870-885MHz
5.	Reverse Channel	824-849MHz	890-915 MHz	925-940MHz
6.	Channel Capacity	30KHz	25KHz	25KHz
7.	Data Rate	10Kbps	8Kbps	0.3Kbps
8.	Spectral Efficiency	0.33bps/Hz	0.33bps/Hz	0.012bps/Hz
9.	Capacity	832 Channel	1000 Channel	600 Channel

Figura 2.5: Tabella dei parametri della rete 2.5G [2]

Di seguito (Fig.2.6) troviamo una tabella riassuntiva delle differenze principali presenti tra le varie versioni della seconda generazione.

Sr.no.	Generation	2G	2.5G	2.75G
1.	Year	1990	2000	2003
2.	Data rates	10Kbps	200Kbps	473Kbps
3.	Technology	Digital wireless	GPRS	EDGE
4.	Switching	Circuit Packet	Packet	Packet

Figura 2.6: Tabella riassuntiva dell'evoluzione delle reti 2G [2]

Rispetto alla precedente generazione l'avvento dei metodi di trasmissione digitale delle reti 2G portarono con sé numerosi miglioramenti in termini prestazionali.

In particolare la quantizzazione dei dati, consentì una maggiore resistenza al rumore garantendo quindi distanze di trasmissione elevate se comparate alle reti 1G ed inoltre la presenza di una codifica di canale rafforzò la segretezza dei dati, riducendo quindi la possibilità che il segnale potesse essere intercettato; l'aumento generale delle prestazioni risultò essere un punto di partenza per le reti odierne. Rimase invece invariata la necessità di una BTS ¹⁰ per consentire la comunicazione tra i dispositivi, opportunamente aggiornate per le trasmissioni digitali.

¹⁰BTS: Base Trans-receiver

2.4 La prima svolta - 3G

La terza generazione di reti mobili nata all'inizio degli anni *duemila* ha implementato per la prima volta, la tecnologia VoIP ¹¹ la quale introduce la possibilità di adoperare il protocollo IP anche per le chiamate vocali. La miglioria principale risiede nell'aumento del *data rate*, è noto infatti che le velocità di trasmissione dati sia stata estesa sino a 42 *Mbps* ¹², rispetto ai 250 *Kbps* ¹² della precedente generazione, un notevole incremento che ha accresciuto il *pool* di servizi offerti e adeguatamente fruibili, come *video-call* e trasmissione di video ad alta risoluzione; garantendo quindi navigazione e download di dati richiedendo minor tempo. Tali caratteristiche derivano da un'implementazione migliorata delle tecniche CDMA, TDMA e FDMA, spesso combinate tra loro che consentirono l'aumento del *data rate* compromettendo la grandezza delle celle dedicate alle reti mobili, le quali hanno subito un ridimensionamento importante. Di seguito è presente una tabella (Fig.2.7) rappresentante le caratteristiche principali delle reti 3G, in comparazione alle reti 2G.

Sr.no.	Parameter	2G	3G
1.	Band	GSM 900,1800,1900	GSM 2100
2.	Access Technique	TDMA+FDMA	CDMA+TDMA CDMA+FDMA
3.	Channel Bandwidth	200KHz	5MHz
4.	Maximum Theoretical Speed	9.6-236Kbps	1.3-2Mbps
5.	Frequency per Cell	2-6	1
6.	Cell Size	500m-25Km	500m-5Km
7.	Mobile phone security	Simple to design authenticate to mobile	Mobile network both authenticate to each other
8.	Video telephony	Not Possible	Possible
9.	Interference level	Very High	Very Less
10.	Handover	Hard Handover	Soft Handover
11.	Online Gaming	Not Possible	Possible
12.	Inter System Handover	Not Possible	Possible
13.	Technology Name	GSM	WCDMA
14.	Bandwidth Demand	Not Possible	Possible

Figura 2.7: Tabella comparativa tra le generazioni 2G e 3G [2]

¹¹ VoIP: Voice over Internet Protocol

¹²Riferita come velocità di *download* di picco

2.5 La tecnologia *MAGIC* - 4G

La parola *MAGIC* citata qui sopra è l'acronimo di *Mobile Multimedia Anywhere Global mobility over Customized services* ed è l'identificativo delle reti 4G. Questa generazione adopera le tecnologie LTE¹³ e WiMAX¹⁴ le quali hanno aumentato le velocità di *download* e *upload* a circa 150¹² Mbps e 86 Mbps¹⁵; questo sostanziale miglioramento rispetto alla precedente generazione è dovuto all'implementazione dello schema di modulazione OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), il quale sarà successivamente oggetto di analisi del presente elaborato. La sostituzione dello schema CDMA ha consentito inoltre di avere una migliore efficienza mantenendo pressoché invariata la struttura di rete, aumentando anche la sicurezza dei dati. Nonostante queste caratteristiche, la rete 4G risulta essere comunque molto complessa nell'implementazione, presentando anche particolari problematiche in termini di *QoS*¹⁶, legati alla corretta recapitazione dei pacchetti dati e a possibili cedimenti della connessione di rete.

Di seguito (Fig.2.8) è raffigurata una tabella rappresentante le principali differenze tra le varie generazioni, tra cui le reti 5G (Cap. 3)

Sr. no.	Parameter	1G	2G	3G	4G	5G
1.	Year of Development	1970-1980.	1990-2004.	2004-2010.	Now.	Soon.
2.	Data Bandwidth	2Kbps.	64Kbps.	2Mbps.	1Gbps	>1Gbps
3.	Technology	Analog cellular technology.	Digital cellular technology.	CDMA 2000	WiMAX LTE WiFi.	WWW
4.	Service	Mobile telephony (Voice).	Digital voice, SMS.	Video and Data.	Wearable Device.	AI Capabilities.
5.	Multiplexing	FDMA.	TDMA/CDMA.	CDMA.	CDMA.	CDMA.
6.	Switching	Circuit.	Circuit and Packet.	Packet.	All Packet.	All Packet.
7.	CORE Network	PSTN.	PSTN.	Packet Network.	Internet.	Internet.

Figura 2.8: Tabella riassuntiva dell'evoluzione delle reti [2]

¹³ *LTE: Long Term Evolution*

¹⁴ *WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access*

¹⁵ Riferita come velocità di *upload* di picco

¹⁶ *QoS: Quality of Services*

Capitolo 3

Le Reti 5G

In questo capitolo verranno esposti i dettagli delle reti 5G porgendo particolare attenzione alla loro struttura e i punti chiave che contraddistinguono tale tecnologia dalle passate. In particolare, prima di soffermarci sui tecnicismi della quinta generazione di reti mobili, è importante sottolineare la seguente affermazione:

“4G changes the life, 5G reshapes the society” [10]

3.1 Scopi e obiettivi delle Reti 5G

Come riportato di seguito nella Figura 3.1, lo scopo principale delle reti 5G è quello di stabilire connessioni salde ed efficaci in vari ambiti e luoghi affinché vi sia l’implementazione di quella che viene chiamata *massive Internet of Things* (mIoT). Per soddisfare questo applicativo sono necessari *data rate* elevati e affidabilità di connessione; integrando un ottimale gestione dei canali di trasmissioni e di ogni singolo slot temporale disponibile. Queste caratteristiche appena esposte rientrano tra i punti focali della tecnologia 5G, ovvero latenza ridotta, capacità di canale e velocità di trasmissione elevati.



Figura 3.1: Rappresentazione generica di un sistema di rete 5G [3]

Prendiamo ora in considerazione gli aspetti sociali e industriali possibili grazie alle reti 5G. Il tessuto sociale beneficia di tali caratteristiche sotto diverse macro categorie, che spaziano dall'istruzione e formazione di ogni livello, sino alla medicina, le *smart homes* e anche ai veicoli connessi, sempre più diffusi. In ambito industriale e commerciale trova ampio utilizzo in termini di *data analysis* e gestione di fabbriche e aziende, nonché le *connected farms*, esempio riportato in Figura 3.2.

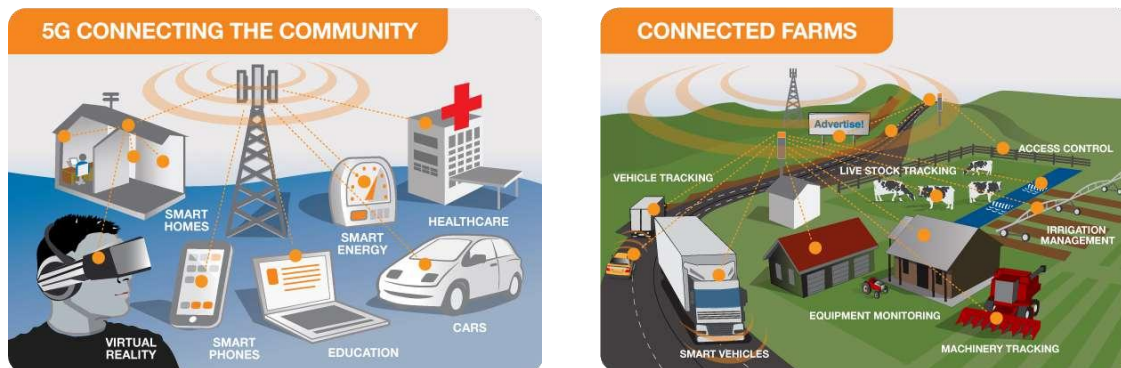


Figura 3.2: Esempi di tessuti sociali e industriali fornite dalla rete 5G [3]

In seguito, nel Capitolo 4, vedremo come le modulazioni oggetto di analisi possano garantire l'attuazione di tali premesse.

3.2 La struttura della Rete 5G

Passiamo ora ad analizzare i principali aspetti tecnici relativi all'infrastruttura di rete, soffermandoci sugli aspetti organizzativi delle rete 5G.

3.2.1 Radio Access Network (RAN)

La RAN si basa su una rete multi-livello che consiste nella suddivisione della banda in varie fasce (*low-band*, *mid-band* e *high-band*), assegnando ogni sezione in base alla tipologia del dispositivo connesso. Ovvero vi è l'assegnazione di un segmento di banda ristretto per dispositivi che richiedono un traffico dati a bassa latenza e all'opposto vi è l'assegnazione di una sezione di banda maggiore ad un dispositivo che necessita di un *data rate* elevato. Due esempi potrebbero essere rispettivamente dei sensori dedicati al mondo delle *smart home* e applicativi molto in voga come *Cloud Gaming*, AR ¹⁷, VR ¹⁸. Esempio intermedio potrebbe essere la guida autonoma di veicoli, la quale necessita sia latenza ridotta che *data rate* elevato.

3.2.2 Core Network (5GC)

Attualmente la maggior parte delle reti 5G commercializzate sono basate su sistemi *Non-Stand Alone* (NSA) i quali si appoggiano alle reti 4G (LTE) per interfacciare la rete con i dispositivi connessi, tramite apposite modifiche nella codifica di canale di cui EPC ¹⁹ ne è l'esponente. Questo ha permesso una rapida diffusione iniziale della tecnologia 5G, senza però sfruttare appieno le potenzialità della neonata generazione; la 5GC ha il compito di gestire e organizzare lo scambio di pacchetti dati all'interno della rete con lo scopo principale di aumentare l'esperienza d'uso per l'utente, semplificare la complessità della rete, nonché aumentare il *pool* di servizi offerti e aumentare la capacità della rete. Difatti la 5GC si tratta di un implementazione dell'architettura di rete creata appositamente dall'ente 3GPP [11] per soddisfare i requisiti già esposti precedentemente.

3.2.3 Network Slicing

Un esempio di *Network Slicing* di fatto consiste nella suddivisione di un'infrastruttura di rete 5G in reti logiche separate con lo scopo di assegnarle a differenti enti senza la necessità di integrare ulteriori infrastrutture. L'applicazione principale è strettamente legata al mondo del *business*, difatti un operatore telefonico che possiede un'infrastruttura di rete 5G, potrebbe dunque cedere in comodato d'uso parte della sue rete ad altre compagnie, grazie all'implementazione del *Network Slicing*.

¹⁷AR: *Augmented Reality*

¹⁸VR: *Virtual Reality*

¹⁹EPC: *Evolved Packet Core*

3.2.4 Network Function Virtualization (NFV)

La tecnologia in oggetto consta in una gestione ed espansione virtuale della capacità di rete, ovvero consente una riparametrazione della rete dinamica in base alle esigenze dei dispositivi connessi. Nonostante possa sembrare simile alla tecnologia RAN, questa si concentra principalmente sulla gestione delle risorse hardware. In particolare questa tecnologia si occupa di effettuare gli aggiornamenti dei software di gestione della rete senza interrompere il servizio.



Figura 3.3: Infrastrutture di rete per la tecnologia 5G [3]

3.2.5 Base Station delle reti 5G

Come citato in precedenza inizialmente le reti 5G hanno fatto affidamento su reti NSA²⁰, dunque si appoggiavano alle *Base Station* delle reti 4G e di conseguenza sulle stesse frequenze (Fig.3.4). In seguito è avvenuto il passaggio alle nuove frequenze, garantendo quindi un significativo miglioramento della capacità della rete e la presenza di spettro aggiuntivo, assicurando un maggior numero di utenti e una maggiore velocità di connessione dati. Il possibile futuro avvento delle *mmWave* potrebbe rendere ancora più efficace questa tecnologia.

Inoltre nelle *Base Station* sono state introdotte antenne di tipo *massive MIMO*²¹ le quali adoperano un esiguo quantitativo di antenne e connessioni per inviare e ricevere dati simultaneamente, garantendo un elevato *throughput*. Date le elevate frequenze operative delle reti 5G, se comparate alla precedente generazione, le singole antenne risultano essere di dimensioni minori, consentendo quindi di inserirne un maggior numero a livello fisico avendo lo stesso spazio a disposizione delle strutture 4G. Altra tecnologia introdotta con la nuova generazione di reti mobili, consiste nel *Beam Steering* che consente alle stazioni radio 5G di indirizzare con maggiore precisione i lobi principale del segnale, tramite l'antenna, verso il dispositivo connesso; questo processo avviene grazie all'implementazione di algoritmi in grado di determinare il

²⁰ NSA: Non-Stand Alone

²¹ MIMO: Multiple Input Multiple Output

miglior percorso percorribile dal segnale per raggiungere il dispositivo in questione, aumentando efficienza e interferenze.

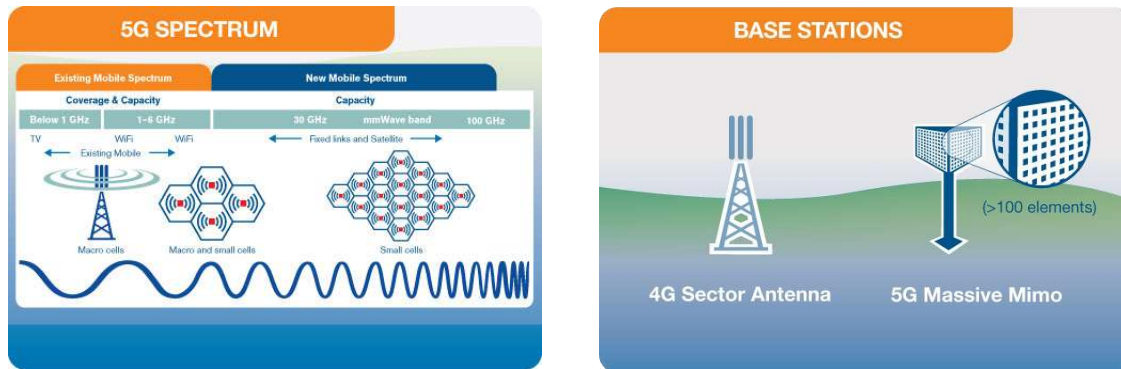


Figura 3.4: Grafici inerenti alle caratteristiche delle *Base Station* [3]

Capitolo 4

Schemi di Modulazione delle Reti 5G

In questo capitolo verranno esposte le varie tipologie di modulazione digitale che vengono adoperate dalla rete 5G, in particolare la modulazione OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Capitolo 4.1) caposaldo della trasmissione dati nelle reti 4G di passata generazione e successivo oggetto di comparazione con quelli che sono gli schemi di modulazione adoperati dalla nuova generazione, tra i quali FBMC - Filter Bank Multi-Carrier (Capitolo 4.2), UFMF - Universal Filtered Multi-Carrier Modulation (Capitolo 4.3), GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing (Capitolo 4.4) ed infine la F-OFDM - Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Capitolo 4.5).

4.1 OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

La modulazione OFDM consiste in un sistema di trasmissione multi-portante che sfrutta la divisione della banda di canale disponibile in sotto-portanti generando segnali ortogonali tra loro. Inoltre, lo schema di modulazione OFDM garantisce il *flat fading* nel canale di trasmissione, ovvero tutti gli elementi in frequenza riportano lo stesso quantitativo di *fading*, poiché la larghezza di banda del segnale ricevuto rientra nella cosiddetta *banda di coerenza*, limite superiore oltre il quale due componenti in frequenza del segnale subiscono *fading* indipendenti. Questa caratteristica di funzionamento è garantita dallo *spacing* di ΔT che viene effettuato tra le sotto-portanti, non rendendole quindi selettive in frequenza. Affinché sia garantita la condizione di ortogonalità tra le sotto-portanti, lo *spacing* appena citato deve essere pari a $\Delta f = 1/T_{Symbol}$, in cui T_{Symbol} corrisponde al tempo di simbolo nel canale di trasmissione. Un diagramma a blocchi di un sistema trasmettitore e ricevitore è rappresentato nella figura 4.1.

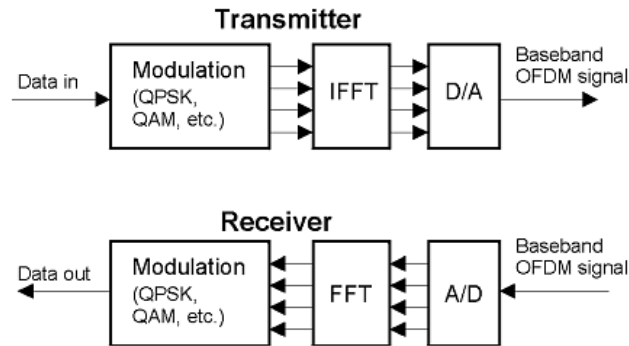


Figura 4.1: Diagramma a blocchi sistema OFDM trasmettitore - ricevitore [4]

4.2 FBMC: Filter Bank Multi-Carrier

La modulazione FBMC non adopera prefissi ciclici (CP), come avviene nella OFDM, di conseguenza sono impiegati meno tempo e banda per la trasmissione dati; in particolare lo schema FBMC filtra singolarmente le sotto-portanti, aumentando l'efficienza spettrale, punto cruciale di questo schema di modulazione. Affinché il filtraggio di ogni singola sotto-portante avvenga correttamente, si necessitano *filtri conici* (*Tapered Filters*) con costanti di tempo molto lunghe, infatti tale costante potrebbe avere un valore pari a circa quattro volte la durata del simbolo trasmesso sulla portante multipla principale; tale peculiarità verrà discussa in seguito nel capitolo 4.2.1.

Per sovvenire alla presenza di Interferenza Intersimbolica (*Intersymbol Interference* - ISI) e Interferenza tra le Portanti (*Intercarrier-Interference* - ICI), nello schema FBMC si provvede ad adoperare una modulazione Offset-QAM, la quale ha il compito di implementare l'ortogonalità tra i sotto-canali con lo scopo ultimo di sfruttare la massima capacità di canale possibile. Come appurato in precedenza in questo schema di modulazione non vi è l'utilizzo dei CP, dunque in supporto alla modulazione OQAM viene adoperato un prototipo di filtro denominato *PHYDYAS* (Physical layer for Dynamic Spectrum Access and cognitive radio) che ha il particolare compito di mantenere l'ortogonalità tra le sotto-portanti (4.2.1). L'utilizzo di queste due tecniche permette di migliorare l'efficienza spettrale e inoltre non vi è la necessità di sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore, a differenza dello schema OFDM.

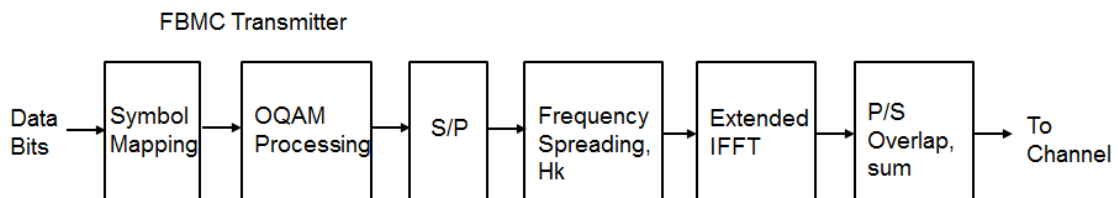


Figura 4.2: Diagramma a blocchi del trasmettitore per modulazione FBMC [5]

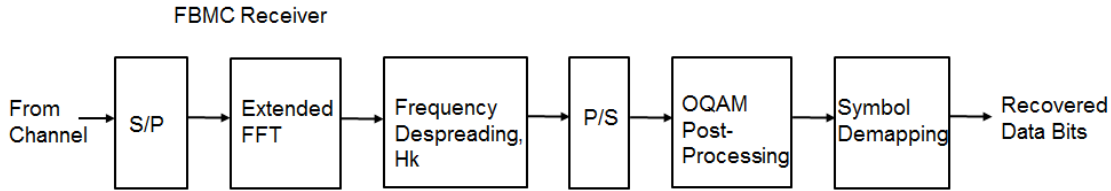


Figura 4.3: Diagramma a blocchi del ricevitore per modulazione FBMC [5]

4.2.1 Filtraggio delle sotto-portanti nella modulazione FBMC

In questo paragrafo procederemo nella descrizione e l'analisi del prototipo di filtro denominato *PHYDYAS* e del relativo fattore di sovrapposizione K ; prima però è utile fare una precisazione in merito alla *IFFT* eseguita nello schema FBMC, poiché esiste una stretta correlazione tra la lunghezza della *IFFT* stessa e il numero totale di sotto-portanti, il che consente una semplice elaborazione dei dati anche nel caso in cui si studiasse il sistema nel dominio del tempo.

Tornando al filtraggio delle sotto-portanti, specifichiamo che l'uso del prototipo *PHYDYAS* presenta una migliore localizzazione ed equalizzazione sia lato trasmissione che lato ricezione, rispetto agli altri filtri considerati nello studio (*es.: Filtro a Coseno Rialzato*). Di seguito viene riportata una tabella rappresentativa dei valori della risposta impulsiva del filtro e la rappresentazione matematica della stessa [6] (Fig.4.4 e Eq. 1).

K	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃
2	1	0.707106	-	-
3	1	0.911438	0.411438	-
4	1	0.971960	0.707106	0.235147

Figura 4.4: Tabella riassuntiva filtro *PHYDYAS* [6]

$$H(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{A}} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k H_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{KT}\right) \right] & t \in [0, KT] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = KT \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k^2 \right] \quad (2)$$

Nella tabella (4.4) i valori riguardanti la risposta impulsiva H_k sono riferiti alle k -esime sotto-portanti alle quali è stato applicato il filtro *PHYDYAS*. I valori di K rappresentati nelle precedenti figure sono frutto di tentativi di ottimizzazione dell'efficienza spettrale, la quale risulta maggiore nel caso in cui la costante valga $K = 4$ e si effettui in precedenza una modulazione OQAM dei simboli, processo del quale parleremo nel capitolo successivo 4.2.2.

4.2.2 Modulazione Offset-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

In questo capitolo osserveremo perché venga adoperata la Offset-QAM nella FBMC e in breve, la caratterizzazione principale che la distingue dalla modulazione QAM. La modulazione Offset-QAM consiste in pratica in una traslazione di un valore $T/2$ della fase rispetto alla modulazione standard QAM; tale valore corrisponde a metà della lunghezza di simbolo da trasmettere. Ne consegue che se la traslazione di $T/2$ (*time-shift*) avviene nella componente **in fase** (*in-phase*) della modulazione QAM, avremmo che questo spostamento si rispecchierà anche sulla componente **fuori fase** (*out-phase*) e di conseguenza anche nei dintorni di quest'ultima; tale peculiarità consente la riduzione delle interferenze tra le portanti secondarie.

Analizzando nel dettaglio le fasi di elaborazione dello schema FBMC, cominciando dal diagramma a blocchi riportato nella figura 4.2, possiamo notare che lo schema OQAM ha il compito di effettuare una modulazione dei simboli prima di essere sottoposti al filtraggio, solo successivamente viene svolta una *IFFT*. Lo stesso accade, specchiato, nel diagramma 4.3, nel quale vi è rappresentato il ricevitore. Anche lato ricezione infatti vi è la combinazione del filtro *PHYDYAS*, della modulazione OQAM e della *FFT* a $N \cdot K$ punti, atti ad effettuare la demodulazione; in questo modo si riducono *Inter Carrier Interference* (ICI), *Intersymbol Interference* (ISI) e si riduce il *Bit-Error-Ratio* (BER); garantendo inoltre un miglior SNR.

Concludiamo definendo quello che è il ruolo primario della modulazione OQAM; infatti essa è inserita principalmente per sopperire alla mancanza dei *Cycling-Prefixes*, opzionali nello schema FBMC, effettuando una "pre-modulazione" che ha lo scopo primario di ridurre al minimo la ISI, garantendo comunque un'alta efficienza spettrale.

4.2.3 Caratteristiche importanti della FBMC

Dalle caratteristiche appena descritte possiamo notare come questa schema di modulazione sia particolarmente adatto a trasmissioni *asincrone*; inoltre questi elementi sono coerenti alle necessità dei sistemi *Cognitive-Radio* che nonostante gli spostamenti rapidi, necessitano di un collegamento costante e affidabile. Questo è per giunta garantito dalla FBMC stessa che da la possibilità di regolare e adattare la durata dei tempi di trasmissione, all'interno della banda, in modo efficiente. D'altro canto però, la FBMC risulta essere poco efficace nell'implementazione di schemi MIMO; risulta infatti necessario introdurre degli intervalli di guardia tra gli utenti in *uplink* per evitare la presenza di ISI. Lo schema in questione risulta inoltre essere sconsigliato per la trasmissione di *burst* brevi di dati, a causa della latenza generata dalla linea di modulazione e filtraggio.

4.3 UFMC: Universal Filtered Multi-Carrier

4.3.1 Caratteristiche principali della modulazione UFMC

Lo schema di modulazione UFMC si posiziona nel mezzo tra OFDM e FBMC; infatti a differenza di questi schemi dove avviene un filtraggio dell'intera banda (OFDM) oppure di ogni singola sotto-portante (FBMC), in questo caso vi è la suddivisione delle N sotto-portanti in diverse sotto-bande, le quali vengono a loro volta raggruppate e successivamente filtrate. La presenza di eventuali *Cyclic-Prefixes* (CP) è stata omessa, nonostante vi sia comunque la possibilità di implementarli con lo scopo di evitare la presenza di *Intersymbol Interference* (ISI). I gruppi di sotto-bande vengono filtrati con l'ausilio di filtri *Dolph-Chebyshev* di lunghezza L ; questo parametro implica che la durata del simbolo trasmesso possa essere identificata dal valore $N + L - 1$. Lo schema di modulazione UFMC che andremo a discutere nel dettaglio successivamente (4.3.2) garantisce l'ortogonalità tra le sotto-portanti, non necessitando quindi di un'aggiuntiva modulazione QAM o OQAM come accade nello schema FBMC che abbiamo appena trattato.

4.3.2 Schema di trasmissione della modulazione UFMC

Seguendo il diagramma a blocchi del trasmettitore UFMC rappresentato nella figura 4.5, cominciamo ad analizzare le varie fasi della modulazione, partendo dal processo di suddivisione delle N sotto-portanti in sotto-bande, le quali hanno a loro volta una quantità fissa di sotto-portanti che non vengono e non possono essere adoperate per la trasmissione. Di seguito si procede con il calcolo della *IFFT* a N punti durante la quale viene aggiunto un padding di zeri alle portanti non allocate per evitare la presenza di ICI; successivamente si procede col filtraggio e le sotto-bande vengono sommate in un unico segnale prima di essere trasmesse tramite il canale.

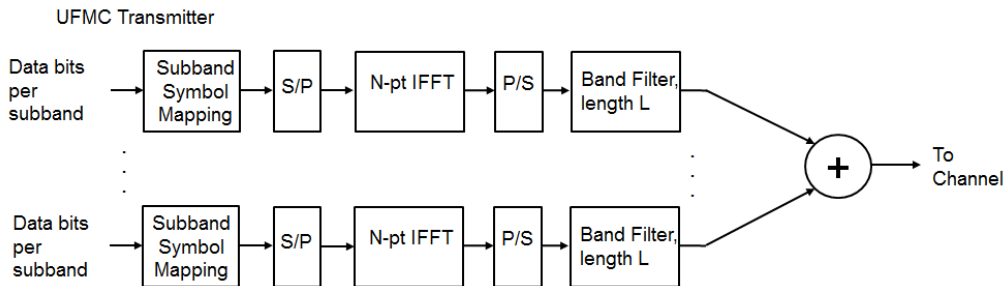


Figura 4.5: Diagramma a blocchi del trasmettitore per modulazione FBMC[7]

Per quanto riguarda invece il lato di ricezione, il cui diagramma è rappresentato nella figura 4.6, notiamo che inizialmente viene svolta una *FFT* di lunghezza $2N$ elementi, in cui gli N elementi di indice pari contengono l'effettivo simbolo trasmesso mentre i restanti N elementi in posizione dispari contengono dati affetti da ICI (*Inter Carrier*

Interference); vengono dunque scartati. In seguito avviene un'equalizzazione del segnale elaborato con lo scopo ultimo di recuperare i dati trasmessi.

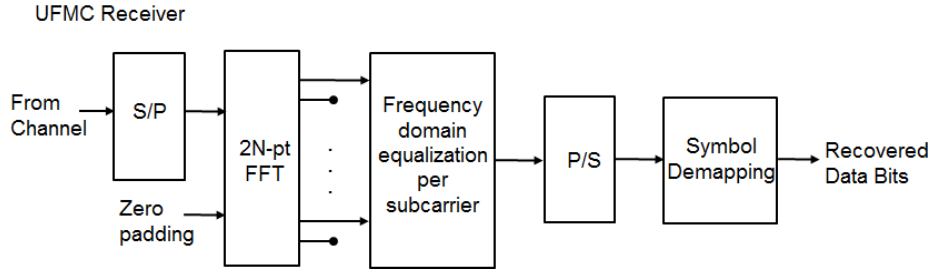


Figura 4.6: Diagramma a blocchi del ricevitore per modulazione FBMC [7]

4.3.3 Caratteristiche importanti della UFMC

Da quanto abbiamo appreso nelle fasi precedenti, lo schema di modulazione UFMC consente di ridurre notevolmente i ritardi dovuti al filtraggio rispetto ai concorrenti di cui abbiamo già discusso; questo vantaggio deriva direttamente dalla struttura di sotto-bande che abbiamo analizzato in precedenza, le quali consentono di diminuire l'*overhead* richiesto per ogni pacchetto dati. Questa caratteristica garantisce la possibilità di avere un'elevata efficienza anche nel caso di trasmissioni brevi (*burst* di dati), assicurando una bassa latenza per ogni trasmissione. Grazie a queste caratteristiche è possibile implementare un'aggiuntiva modulazione QAM nel canale di trasmissione, affinché sia possibile adoperare uno schema MIMO.

D'altro canto però lo schema UFMC non risulta essere comunque adatto per *data rate* elevati, i quali possono dar luogo a un ritardo generalizzato che si espande lungo tutta la linea di trasmissione. Per adattare lo schema FBMC a tale necessità si devono implementare equalizzatori *multi-tap*, che equalizzano il segnale nel dominio delle frequenze. Risulta quindi necessario un passaggio aggiuntivo che compromette l'efficienza temporale di questo schema di modulazione.

4.4 GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing

Lo schema di modulazione GFDM consta in un metodo di trasmissione multiportante in grado di adattarsi a quelle che sono le condizioni e le necessità del canale di trasmissione; questo schema di modulazione non presenta nativamente ortogonalità tra le portanti, comportando la possibile presenza di ISI e ICI nel segnale ricevuto. Inoltre, lo schema GFDM si basa sulla *filter bank theory* (concetto base dello schema FBMC), ma ne estrapola solo il concetto di base; difatti come vedremo nel prossimo capitolo la nozione di funzionamento principale si basa sul raggruppamento dei simboli da trasmettere. I punti di forza della GFDM risiedono nella gestione ottimale della banda disponibile e la capacità di ridurre il PAPR (*Peak-to-Average-Power-Ratio*).

4.4.1 La schema di modulazione GFDM

In questo paragrafo cercheremo di rappresentare i concetti che stanno alla base del *transceiver* dello schema di modulazione GFDM. Inizialmente vi è la divisione della banda in K differenti sotto-portanti alle quali vengono assegnati M sotto-simboli; a quest'ultimi viene applicato uno *shift* circolare, che prende il nome di *Tail Biting*, in M differenti slot temporali. Per evitare la presenza di ICI o ISI, viene aggiunto un CP ad ognuno degli M sotto-simboli assegnati alle K sotto-portanti. Al termine di queste operazioni il segnale modulato con lo schema GFDM trasporterà $N = K \cdot M$ simboli contenenti i dati da trasmettere. Lo *shift* dei sotto-simboli, accennato in precedenza, avviene tramite il filtraggio dei blocchi di sotto-simboli impiegando un filtro *Root Raised Cosine* (RRC), in grado di soddisfare la necessità di adoperare la tecnica del *Tail Biting*.

Lo schema di modulazione GFDM risulta essere in grado di effettuare trasmissioni asincrone. Tuttavia questa sovrapposizione tra le sotto-portanti dà luogo ad un *Bit-Error-Ratio* (BER) elevato; vi si impiegano quindi metodi di equalizzazione e di rimozione delle interferenze lato ricevitore per mitigare questo fenomeno.

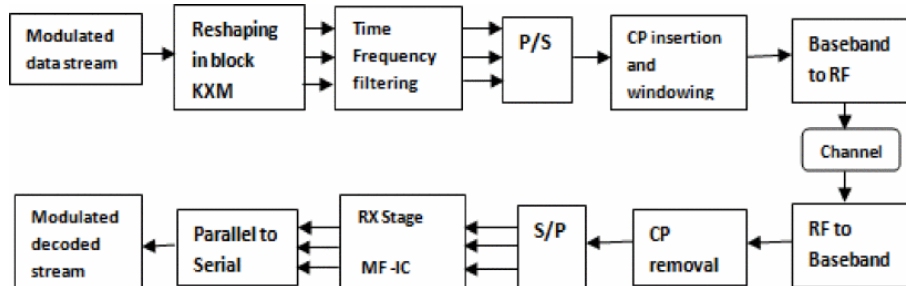


Figura 4.7: Diagramma a blocchi del ricetrasmittitore dello schema GFDM [8]

4.4.2 Caratteristiche importanti della GFDM

Come riportato precedentemente nel capitolo 4.4.1, tra i punti focali della GFDM troviamo la suddivisione dello spettro totale in più segmenti, assegnati a loro volta ai singoli utenti; questo aspetto rende lo schema di modulazione GFDM ideale per le *Cognitive Radio*. Infatti il ricetrasmittitore riportato in figura 4.7 opportunamente adattato sarebbe in grado di verificare quali canali di trasmissione siano in uso ed è quindi capace di assegnarli correttamente agli utenti, ottimizzando le connessioni. Lo schema di modulazione GFDM presenta molteplici vantaggi, tra i quali troviamo un PAPR ridotto, delle emissioni *out-of-band* anch'esse considerevolmente ridotte, a patto di svolgere una rettifica al processo di filtraggio; inoltre, è presente la possibilità di effettuare una programmazione efficace dei canali multi-utente sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze, ottimizzando l'utilizzo della banda a disposizione, raggruppando i buchi dello spettro. Considerando che lo schema di modulazione GFDM adoperava blocchi di dati nel canale di trasmissione, ciò permette di avere efficienza in termini di equalizzazione e affidabilità nella recapitazione dei dati.

Bisogna però tener conto che lo schema GFDM risulta essere complesso soprattutto lato ricezione; necessita infatti di *Matched Filters* e dell'utilizzo della modulazione OQAM, atti alla rimozione delle interferenze; questa particolare implementazione aumenterebbe la complessità di attuazione di sistemi MIMO.

4.5 F-OFDM: Filtered-OFDM

Com'è possibile intuire già dalla denominazione, lo schema F-OFDM è una variante della OFDM che per l'appunto ha come principale distinguo, il filtraggio. Infatti la totalità della banda disponibile viene divisa in un certo numero di sotto-bande con lo scopo di assegnarle in modo efficace a determinati utenti in base all'applicativo necessario. In questo modo si ottiene un efficace utilizzo dello spettro, garantendo anche una diversificazione dei servizi. Nonostante sia presente questa rilevante caratteristica appena esposta, di base, lo schema F-OFDM si presenta come uno schema OFDM al quale viene aggiunto un filtro per le sotto-bande.

A differenza della modulazione OFDM, lo schema di cui si sta trattando in questo capitolo presenta una maggiore flessibilità per quanto riguarda la dinamicità della lunghezza del *Cycling-Prefix* e degli intervalli di tempo dedicati alle trasmissioni dati; infine garantisce anche un adeguato distanziamento tra le sotto-portanti.

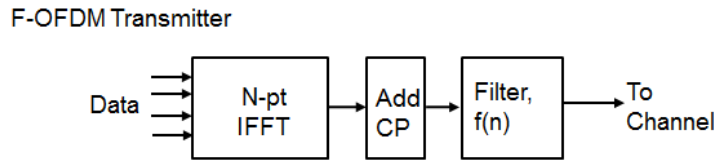


Figura 4.8: Diagramma a blocchi del trasmettitore dello schema F-OFDM [5]

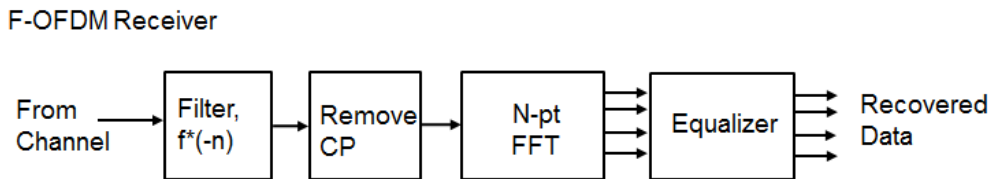


Figura 4.9: Diagramma a blocchi del ricevitore dello schema F-OFDM [5]

4.5.1 Implementazione di uno schema F-OFDM

Come citato nel capitolo 4.5 lo schema di modulazione F-OFDM implementa un filtro aggiuntivo dedicato alle sotto-bande; si tratta di un filtro *equiripple* corto che ha lo scopo di migliorare le emissioni *out-of-band* del segnale relativo alla sotto-banda in questione. La costante di tempo del filtro varia in base al CP, in alcuni casi ne eccede la durata. Importante notare come sia a volte necessario mitigare il verificarsi di ISI adottando la tecnica del *windowing*. Nonostante quest'ultimo limite, lo schema F-OFDM consente di avere una certa flessibilità nell'utilizzo delle diverse sotto-bande per differenti utenti collegati alla rete. Questa adattabilità ad esempio consente ad applicativi ad alta latenza di ridurre la durata del simbolo e al contempo aumentare la spaziatura tra le sotto-portanti.

Dalle figure 4.8 e 4.9, che rappresentano rispettivamente trasmettitore e ricevitore dello schema F-OFDM, possiamo notare come l'implementazione del ricevitore risulti essere l'opposto del lato trasmissione; in particolare la costante di tempo del filtro risulta essere di segno opposto a quella del trasmettitore.

4.5.2 Considerazioni finali sullo schema F-OFDM

Lo schema F-OFDM, come definito nel capitolo 4.5.1, risulta essere particolarmente complesso; tali caratteristiche lo rendono difficile da implementare sia dal lato strutturale che da quello attuativo.

Possiamo però evidenziare che tale complessità garantisce ampia malleabilità della modulazione, garantendo la possibilità di parametrizzare lo schema in base alle necessità dell'applicativo; ad esempio è possibile configurarlo per trasmissioni asincrone. In aggiunta lo schema F-OFDM presenta una buona reiezione alle emissioni *out-of-band*, garantendo comunque la coesistenza delle forme d'onda.

Capitolo 5

Confronto tra Schemi di Modulazione 5G

In questo capitolo verranno confrontati gli schemi di modulazione di cui abbiamo parlato nel capitolo 4, in particolare verranno analizzati gli schemi UFMC (Capitolo 5.1), FBMC ((Capitolo 5.2)) e F-OFDM (Capitolo 5.3), in rapporto con lo schema di modulazione OFDM.

5.1 Confronto tra UFMC e OFDM

In questo capitolo analizzeremo i risultati di una comparazione svolta in ambiente *MATLAB* [7] tra gli schemi di modulazione UFMC e OFDM, con lo scopo di trarre delle conclusioni riguardo i punti di forza dei due schemi che andremo ad osservare. In questa simulazione vengono adoperati i parametri riportati nella tabella 5.1, relativi allo schema UFMC.

FFT size	512
Sub-band size	20
Number of sub-bands	10
Filter length	43
Side lobe attenuation	40 dB

Figura 5.1: Tabella dei parametri relativi allo schema UFMC [7]

Di seguito possiamo notare come lo spettro rappresentato in figura 5.3 ci fornisca informazioni importanti sull'utilizzo della banda; difatti, considerando che nella simulazione non vengono adoperati i *Cycling-Prefixes* per lo schema OFDM, si può notare come quest'ultima risulti essere totalmente occupata, evidenziando quindi una scarsa efficienza spettrale.

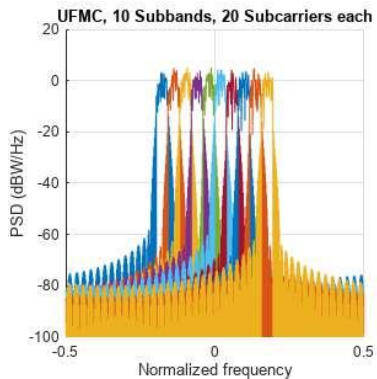


Figura 5.2: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema UFMC [7]

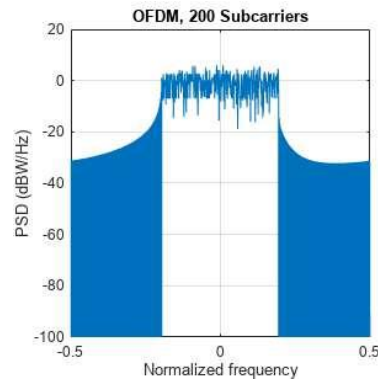


Figura 5.3: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema OFDM [7]

Dalle simulazioni svolte, nello studio del PAPR, si ottiene un valore di 8.2379 dB per lo schema UFMC e di 8.8843 dB per lo schema OFDM. Inoltre, confrontando le figure 5.2 e 5.3, nelle quali sono riportati i PSD degli schemi di modulazione oggetto di analisi, possiamo notare come vi sia un minor numero di lobi laterali per lo schema UFMC che consentono quindi un miglior utilizzo dello spettro. Come riportato precedentemente infatti vi è un fattore di cresta ridotto (PAPR) per lo schema UFMC, il che permette la trasmissione di maggiori bit nonostante si opti per l'utilizzo di un hardware a bassa potenza, in relazione alle prestazioni che potrebbe fornire lo schema OFDM.

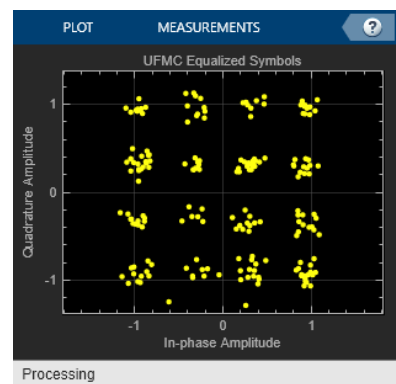
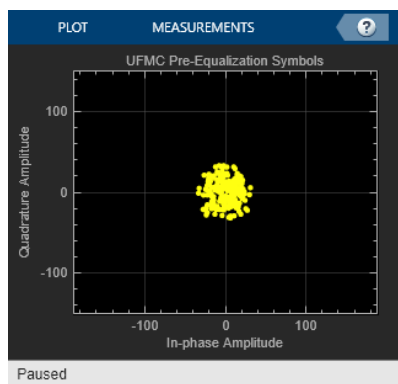


Figura 5.4: Grafico della costellazione dei simboli dello schema UFMC [7]

Per il calcolo del *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR) della UFMC è stato adoperato un ricevitore senza effetti di canale, al quale però è stato aggiunto del rumore, lato ricezione, per ottenere dei parametri che potessero essere reali. Dunque con il rumore aggiunto al segnale ricevuto, si è ottenuto per lo schema di modulazione UFMC un SNR di 15 dB ed inoltre si è calcolato un *Bit-Error-Ratio* (BER) nullo, con un numero di simboli utilizzati per la simulazione pari a 10^5 ($BER < 10^{-5}$). Nella

figura 5.4 vi è rappresentato il diagramma della costellazione di simboli relativi allo schema UPMC.

5.2 Confronto tra FBMC e OFDM

Anche in questo capitolo analizzeremo i risultati di una comparazione svolta in ambiente *MATLAB* [9]. Gli schemi di modulazione in oggetto saranno FBMC e OFDM. Dal confronto, osserveremo i punti di forza di entrambi, traendone delle conclusioni. In questa simulazione vengono adoperati i parametri riportati nella tabella 5.5, relativi allo schema FBMC.

FFT size	1024
Number of guard bands	212
Spreading factor, overlapping factor (k)	4
Number of symbols	100
Bits per subcarrier (4QAM)	2
SNR	12 dB

Figura 5.5: Tabella dei parametri dello schema FBMC [9]

Dall'analisi dei grafici 5.6 e 5.7 delle PSD degli schemi FBMC e OFDM, si può notare che anche in questo caso lo schema OFDM presenta un maggior numero di lobi laterali rispetto al concorrente; questo dato implica che lo schema di modulazione FBMC risulta avere una maggiore efficienza spettrale.

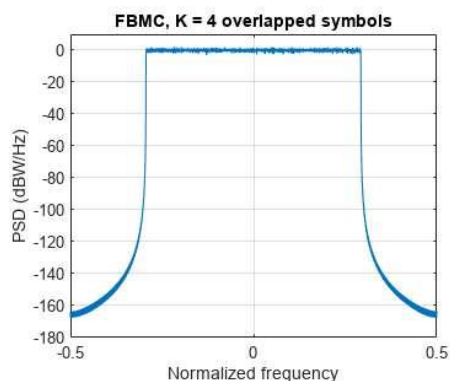


Figura 5.6: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema FBMC [9]

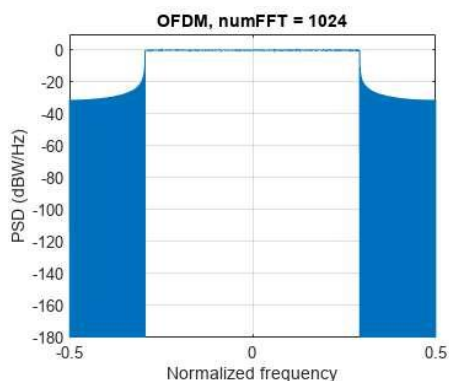


Figura 5.7: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema OFDM [9]

In seguito, si è proceduto con la misurazione del *Bit-Error-Ratio* (BER), tenendo presente l'assenza di *Fading* nel canale di trasmissione; inoltre questo parametro

è stato estrapolato successivamente alla fase di filtraggio e decodifica OQAM dei dati. Il valore di BER ottenuto per lo schema FBMC con fattore di sovrapposizione $k = 4$ è pari a zero, anche in questo caso con un numero di simboli utilizzati per la simulazione pari a 10^5 ($\text{BER} < 10^{-5}$).

Per il calcolo del *Signal-to-Noise-Ratio* si è tenuto conto del fattore $k = 4$ e dell'implementazione del demodulatore lato ricezione; il valore finale si attesta ad un valore di 12 dB, confermando di conseguenza un esiguo miglioramento dell'efficienza spettrale rispetto allo schema OFDM.

5.3 Confronto tra F-OFDM e OFDM

Come avvenuto nei capitoli precedenti all'interno di questo paragrafo procederemo con l'analisi dei risultati di un studio svolto in ambiente *MATLAB* [5]. Gli schemi di modulazione in oggetto in questo caso saranno F-OFDM e OFDM. Il confronto risulta essere molto interessante poiché deriva dall'analisi di una variante dello schema comparativo principale adoperato nei casi precedenti. Sarà importante notare quali migliorie si sono riuscite ad ottenere con lo schema F-OFDM. In questa simulazione consideriamo i parametri riportati nella tabella 5.8, relativi allo schema F-OFDM.

FFT size	1024
Number of RBs	50
Number of sub-carriers/RB	12
CP Length	72
Bits per subcarriers (64QAM)	6
SNR	18 dB
Filter length	513

Figura 5.8: Tabella dei parametri dello schema F-OFDM [5]

Come descritto nel capitolo 4.5 inerente allo schema F-OFDM, si deve prestare particolare attenzione all'operazione di filtraggio delle sotto-portanti. Difatti nella simulazione *MATLAB* si è adoperato un filtro ideale *sinc*, la cui risposta impulsiva presenta una banda passante piatta e una sufficiente attenuazione in banda d'arresto; il siffatto filtro è stato creato adoperando la tecnica del *windowing*. La risposta impulsiva appena esposta risulta essere rappresentata nel grafico 5.9.

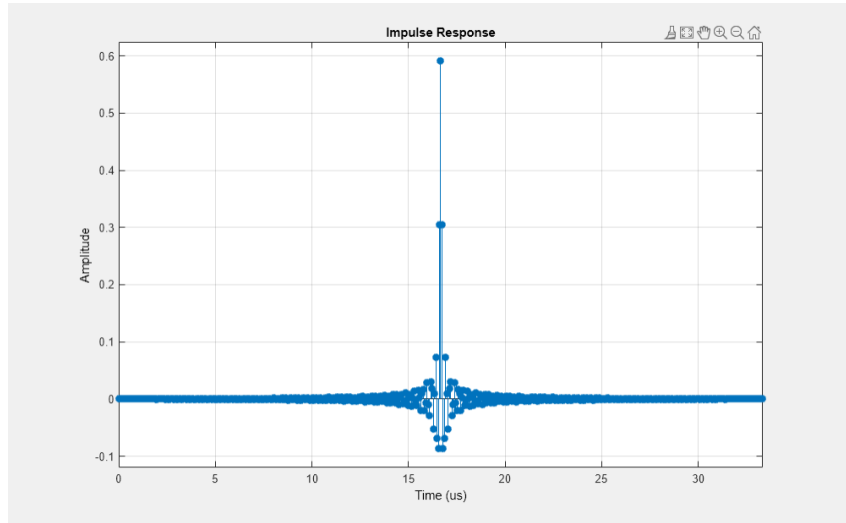


Figura 5.9: Grafico della risposta impulsiva del filtro *sinc* [5]

Di seguito, nelle figure 5.10 e 5.11 vengono riportati i grafici della PSD degli schemi F-OFDM e OFDM; come nei casi precedenti notiamo che la tecnologia OFDM presenta sempre un numero maggiore di lobi laterali che pregiudicano l'efficienza spettrale del sistema. Per giustificare i grafici possiamo adoperare i valori del PAPR dei due schemi F-OFDM e OFDM, i quali sono rispettivamente 11.371 dB e 9.721 dB.

A sostegno della migliore efficienza spettrale proposta dallo schema F-OFDM, possiamo procedere ancora una volta col calcolo di SNR e BER per lo schema appena citato. Affinché si ottengano dei valori corretti dobbiamo tener conto dei filtri adoperati nella linea di trasmissione i quali risultano essere identici; unica importante differenza risiede nella costante di tempo del filtro lato ricezione che risulta essere di segno opposto rispetto la controparte del lato trasmissione. È bene tener conto anche del rumore aggiunto al segnale ricevuto e che il canale in dissolvenza non è adoperato. Fatte tali premesse, si ottengono un SNR di 18 dB e un BER di 0.00083333 che appunto sono concordi con quanto riportato in precedenza, nonostante vi sia un sostanziale differenza del BER rispetto alla controparte OFDM.

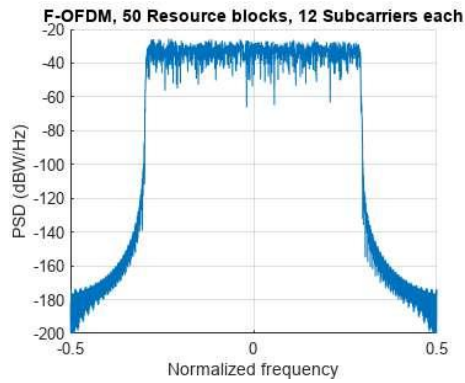


Figura 5.10: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema F-OFDM [5]

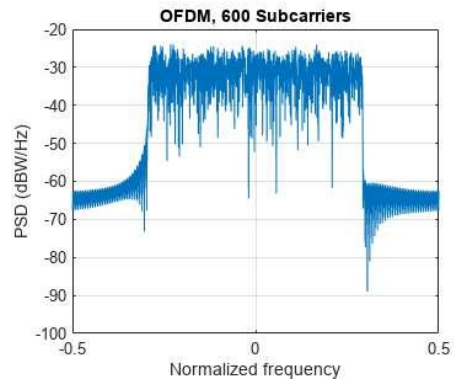


Figura 5.11: Grafico della *Power Spectral Density* dello schema OFDM [5]

Di seguito è riportato il diagramma della costellazione dei simboli demodulati dello schema F-OFDM è riportato nella figura 5.12.

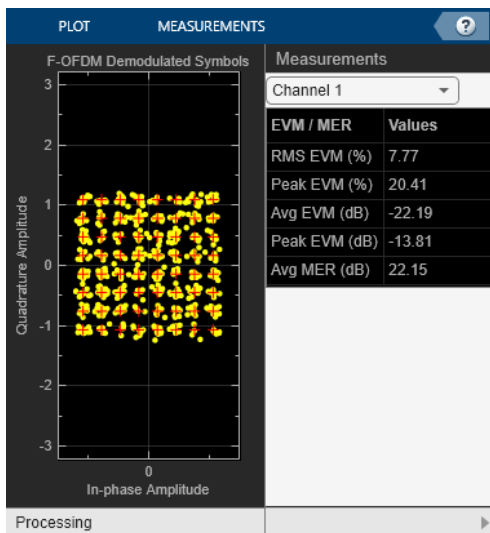


Figura 5.12: Grafico della costellazione dei simboli dello schema F-OFDM [5]

Capitolo 6

Conclusioni

In questa sezione procederemo ad analizzare i risultati ottenuti nei precedenti capitoli, cercando di trarre conclusioni su quali possano essere gli schemi di modulazione migliori per le reti 5G e se essi possano essere categorizzati in base alle condizioni e le necessità di utilizzo da parte degli utenti. Infine procederemo con una panoramica generale su quelle che saranno le reti mobili del futuro, presumibilmente, le reti 6G.

6.1 Considerazioni finali sugli schemi di modulazione analizzati

In questo paragrafo, come citato nell'introduzione, procederemo all'analisi delle caratteristiche e dei risultati che abbiamo riportato nei precedenti capitoli. Lo scopo principale di questo elaborato era infatti quello di riportare i possibili candidati per gli schemi di modulazione adoperabili dalle reti 5G, enfatizzando quelli che potessero essere i punti comuni e i punti di forza dei singoli pacchetti. Facendo riferimento al capitolo 5, nel quale abbiamo confrontato la modulazione OFDM con i candidati schemi di modulazione UFMC, FBMC e F-OFDM, con l'ausilio dei risultati che abbiamo osservato, possiamo ora evidenziare alcuni aspetti fondamentali su questi schemi di modulazione. Di seguito si procederà con l'analisi di tre differenti proprietà: *efficienza spettrale* [in riferimento al *Peak-to-Average-Power-Ratio* (PAPR)], il *Bit-Error-Ratio* (BER) ed infine il *Signal-to-Noise Ratio* (SNR).

6.1.1 Efficienza spettrale - Analisi del PAPR

Di seguito troviamo una tabella riassuntiva (Fig.6.1) dei valori relativi alle comparazioni svolte nel capitolo precedente; vengono presentati i PAPR di ogni singolo schema analizzato, tranne nel caso della FBMC del quale non abbiamo dati al riguardo.

PAPR	UFMC	8.2379 dB	OFDM	8.8843 dB
	FBMC	-		-
	F-OFDM	11.371 dB		9.721 dB

Figura 6.1: Tabella riassuntiva dei PAPR rilevati dalle simulazioni

Questi dati, avvalorati dai grafici delle densità spettrali riportati in precedenza, ci consentono ancora una volta di affermare che gli schemi di modulazione presentati riportano una migliore efficienza spettrale rispetto allo schema OFDM. Importante notare come nei casi degli schemi UFMC e F-OFDM, si presenta una riduzione del PAPR, che ne avvalorata la loro efficacia.

6.1.2 Bit-Error-Ratio (BER)

Come nel precedente paragrafo, di seguito è riportata una tabella riassuntiva (Fig.6.2) dei valori del BER rilevati. Notiamo che i valori si accostano allo zero o comunque sono prossimi a tale valore, indicando comunque una buona efficacia di trasmissione. Fondamentale ribadire come questi valori siano stati ottenuti in assenza di *fading* del canale e con l'aggiunta di rumore al segnale ricevuto.

BER	UFMC	0 ($<10^{-5}$)
	FBMC	0 ($<10^{-5}$)
	F-OFDM	0.00083333

Figura 6.2: Tabella riassuntiva dei BER rilevati dalle simulazioni

6.1.3 Signal-to-Noise Ration (SNR)

Terminiamo la nostra rassegna di analisi dei risultati, osservando la tabella riassuntiva (Fig.6.3) riportata di seguito; inerente ai valori di SNR degli schemi di modulazione. Come nel caso del calcolo del BER, non vi è *fading* nel canale di trasmissione ed è stato aggiunto del rumore al segnale ricevuto. Anche in questo caso possiamo notare valori differenti ma vicini tra loro; spicca nella tabella il valore di SNR dello schema F-OFDM, il quale risulta esser il più elevato, il che garantisce una maggiore protezione dal rumore, nonostante il valore del BER risulti essere solo prossimo allo zero.

SNR	UFMC (4QAM)	15 dB
	FBMC (4QAM)	12 dB
	F-OFDM (64QAM)	18 dB

Figura 6.3: Tabella riassuntiva dei SNR rilevati dalle simulazioni

Al termine dell'analisi possiamo constatare come gli schemi proposti siano comunque validi nella loro totalità, in particolare potrebbero essere adoperati differenti schemi di modulazione in base alle necessità degli utenti collegati alla rete 5G. Però se parliamo lo schema UFMC con lo schema FBMC, quest'ultimo risulta essere più complesso e meno efficiente in termini di tempo; come riportato nel capitolo 4.2; difatti questo schema di modulazione richiede un maggior numero di filtri, dedicati al filtraggio delle sotto-portanti, il che si traduce in un aumento dei tempi di trasmissione del segnale, rendendo anche difficile l'implementazione dei sistemi MIMO.

6.2 Le reti mobili del futuro

Attualmente la commercializzazione della sesta generazione di reti mobili (6G) è stata prevista per l'anno 2030 se non oltre, portando con se infiniti scenari di utilizzo. Secondo recenti documentazioni e conferenze, le possibili visioni del 6G potrebbero comprendere ed integrare svariati scenari tecnologici come *Intelligent Life*, *Intelligent Production* e *Intelligent Society*. Questi termini verranno analizzati in breve e potrebbero rappresentare la vita del domani.

6.2.1 Intelligent Life

Questo scenario si sviluppa tramite il *Synaesthesia Internet*, la *Twin Body Area Network* (TBAN) e la *Intelligent Interaction*. Tutti questi ambiti rappresenteranno un nuovo modo di interazione tra umani, difatti la TBAN rappresenterà un'evoluzione della *Body Area Network* (BAN) e potrebbe addentrarsi sino a livelli molecolari, tramite l'utilizzo di nanomateriali e sensori dedicati, rivoluzionando il mondo della rilevazione dei parametri vitali. Ad avvalorare questo possibile futuro vi è il *Synaesthesia Internet*, scenario in cui l'essere umano potrebbe interagire non solo con testo, voce o immagini, ma attraverso le percezioni sensoriali o addirittura tramite emozioni. A completare questa visione futuristica vi è la *Intelligent Society* che dovrebbe quindi racchiudere i due scenari precedenti, sviluppandosi però con interazioni tra uomo e macchina, ad esempio dispositivi di smart home che necessitano di istruzioni vocali o visuali da parte degli utenti. Quest'ultimo aspetto non pare nemmeno essere troppo lontano, soprattutto dopo la larga scala che hanno acquisito le *Intelligenze Artificiali* (IA) nell'ultimo periodo.

6.2.2 Intelligent Production

Con l'approdo di tecnologie sempre più mirate all'*Internet-of-Things* (IoT), questo particolare scenario si sviluppa attorno al settore industriale, trovando spazio nella *Intelligent Agriculture* e nella *Intelligent Industry*. Tramite l'utilizzo di tecnologie già in uso come VR, droni, sensori intelligenti dotati di rete mobile, etc.. si potranno incrementare i fattori di produttività, ad esempio, nell'ambito dell'agricoltura, migliorando l'efficienza di ogni singola fase di produzione. Quanto appena esposto potrebbe valere anche in ambito forestale, in ambito ittico, trovando inoltre largo spazio in ambito industriale. Infatti quest'ultimo scenario rappresenta già uno sprazzo di quella che è la vita lavorativa odierna nei luoghi di lavoro in cui vi è presente un'interazione tra uomo e macchina, ad esempio nelle linee di produzione; questo è solo il punto di partenza di quelle che saranno le tecnologie del domani.

6.2.3 Intelligent Society

Quest'ultimo ambito si basa principalmente su tre scenari: *Super transportation*, *Universal Public Services* e *Refine Social Governance*. Questi risultano essere estremamente collegati tra loro, in particolare si basano principalmente su una gestione remota di servizi pubblici, di sorveglianza degli ambienti e delle reti di trasporto. Si potrebbe ad esempio avere la necessità di impiegare una rete interconnessa che riesca costantemente a coordinare diversi ambiti e correlarli tra loro. Un particolare caso di dipendenza tra *Super transportation* e *Refine Social Governance* potrebbe essere quello della guida autonoma di veicoli e le necessità di avere dati significativi sulle condizioni del traffico in tempo reale senza limitazioni in termini di latenza e posizione; ad esempio un veicolo che sta percorrendo un tratto di strada in una zona remota. Come riferimento al caso appena esposto, possiamo parlare degli *Universal Public Services* i quali si specializzano in quella che è la divulgazione di informazioni, che siano di base scientifica piuttosto che essi siano basati sull'istruzione; il compito principale è quindi quello di assicurare connessioni dati a zone limitrofe o luoghi in cui è difficile stabilire e mantenere una connessione, assicurando lo sviluppo tecnologico ed economico di queste aree.

Una rappresentazione dei possibili scenari appena esposti è raffigurata di seguito (Fig.6.4).

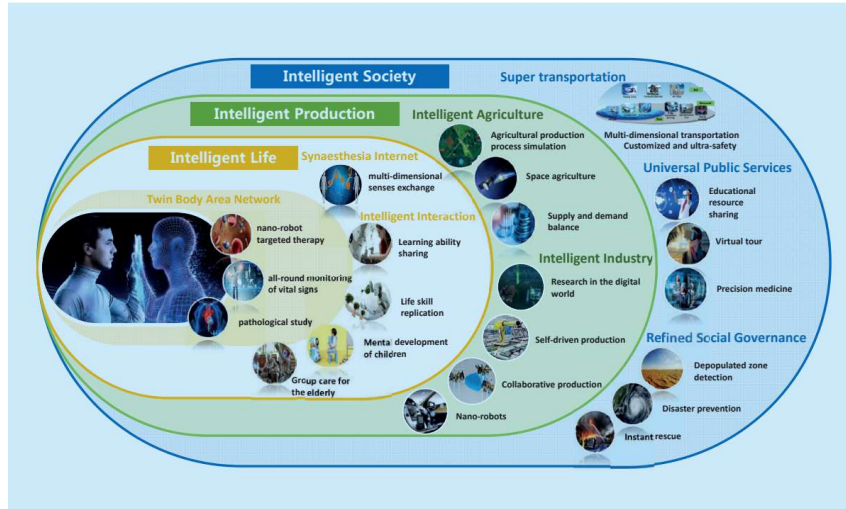


Figura 6.4: Possibili scenari di utilizzo delle reti 6G [10]

6.2.4 Possibili parametri necessari per le reti 6G

Di seguito, nella figura 6.5 troviamo una tabella riassuntiva e comparativa dei parametri che potrebbero essere necessari per le future reti 6G.

Network Performance Requirements	5G KPIs	6G KPIs	Potential enabling technologies
Peak data rates	DL: 20Gbps UL: 10Gbps	Tbps level	Orbital angular momentum, super-large scale antenna, visible light, THz, new coding & modulation
User experience rate	DL: 100Mbps UL: 50Mbps	10-100Gbps	Orbital angular momentum, super-large scale antenna, visible light, new coding & modulation, user centric network, AI
Control plane latency	10ms	<1ms	Soft network, AI, new network architecture, new protocol architecture of radio access network
User plane latency	eMBB <4ms URLLC <0.5ms	<0.1ms	AI, new network architecture, new protocol architecture of radio access network
Reliability	99.999%	>99.99999%	Full-frequency access, space-air-ground integrated network, trusted computing, super-large-scale antenna, new network architecture, new protocol architecture of radio access network
Mobility	500km/h	>1000km/h	Flexible frequency access, space-air-ground integrated network, new modulation
Traffic capacity	10Mbps/m ²	0.1-10Gbps/m ³	Orbital angular momentum, super-large scale antenna, visible light, THz, new coding & modulation, full-frequency access, ultra dense network
Connection density	1 million devices/km ²	10-100 million devices/km ³	New coding & modulation, new multiple access, grant-free access, full-frequency access, ultra dense network
Spectral efficiency	DL: 30bps/Hz UL: 15bps/Hz	2-3 times compared to 5G	Orbital angular momentum, super-large scale antenna, new coding & modulation
Network energy efficiency	-	10-1000 times compared to 5G	AI, lite network, new hardware architecture, new chipset
Positioning accuracy	Outdoor: 10m Indoor: 3m	Outdoor: sub-meter level Indoor: centimeter level	Super-large scale antenna, higher frequency, multi-site coordination, AI

Figura 6.5: Confronto parametri tra reti 5G e le future reti 6G [10]

Come si può notare, i punti focali in termini di necessità e prestazioni, rispecchiano principalmente quelli della generazione attuale. Vi sono importanti differenze tra 5G e 6G per quanto riguarda i valori della banda disponibile e le prestazioni di *download* e *upload* della rete; i valori per il 6G dovranno essere di una grandezza d'ordine maggiore rispetto alla tecnologia attuale.

Affinché le caratteristiche riportate nei paragrafi precedenti possano essere attuabili nel futuro, sono necessari latenza prossime o inferiori al *millisecondo* e solidità di connessione, in situazioni stazionarie ma soprattutto in condizione di mobilità dell'utente, anche se estrema (alte velocità di spostamento).

Di pari passo con l'ampliamento delle tecnologie si procederà anche all'ulteriore aumento dell'affidabilità della connessione di rete, nonostante siano previsti dai 10 ai 100 milioni di dispositivi connessi per metro cubo, ovvero circa dalle 10 alle 100 volte tanto quanto possibile dall'attuale tecnologia di rete 5G.

Tra i parametri riportati nella tabella troviamo anche l'*efficienza spettrale* che è uno dei principali elementi oggetto di studio di questo elaborato. La previsione svolta per le future reti 6G si attesta attorno alle 2-3 volte maggiore rispetto all'*efficienza spettrale* degli schemi di modulazione delle reti 5G. Quest'ultimo valore sarà fonda-

mentale per gli studi che si svolgeranno nello sviluppo degli schemi di modulazione per le reti 6G e ci fornisce un'idea su quali e quanti saranno gli sviluppi da svolgere affinché le tecnologie attuali, in particolare quelle analizzate in questo documento, possano raggiungere tali prestazioni avendo come riferimento un nuovo parametro che sarà sempre più comune nei sistemi del futuro, ovvero la *Network energy efficiency*.

Bibliografia

- [1] “Telecommunication Network Diagrams | Telecommunication networks. Computer and Network Examples | How to Create a Telecommunication Network Diagram | Telecommunication Network Chart,” <https://www.conceptdraw.com/examples/telecommunication-network-chart>.
- [2] V. Yadav, L. Kumar, and P. Kumar, “Evolution and development of wireless communication system,” in 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 2019, pp. 53–57.
- [3] “Emf - 5g Explained - How 5g Works,” <https://www.emfexplained.info/?ID=25916>.
- [4] Mathworks. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/discovery/ofdm.html>
- [5] Mathworks. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/comm/ug/f-ofdm-vs-ofdm-modulation.html>
- [6] A. Ramadhan, “Implementation of 5g fbmc phydyas prototype filter,” International Journal of Applied Engineering Research, vol. 12, 12 2017.
- [7] Mathworks. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/comm/ug/ufmc-vs-ofdm-modulation.html>
- [8] S. Nagul, “A review on 5g modulation schemes and their comparisons for future wireless communications,” in 2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), 2018, pp. 72–76.
- [9] Mathworks. [Online]. Available: <https://it.mathworks.com/help/comm/ug/fbmc-vs-ofdm-modulation.html>
- [10] G. Liu, Y. Huang, N. Li, J. Dong, J. Jin, Q. Wang, and N. Li, “Vision, requirements and network architecture of 6g mobile network beyond 2030,” China Communications, vol. 17, no. 9, pp. 92–104, 2020.
- [11] a. , “5g System Overview,” <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>, aug 8 2022.

- [12] G. Srikanth, S. L. Nisha, and S. G. S. Prasad, “Performance of fbmc for 5g communication,” in 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 2018, pp. 828–832.
- [13] R. T. Kamurthi and S. R. chopra, “Review of ufmc technique in 5g,” in 2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS), 2018, pp. 115–120.
- [14] I. B. Franco de Almeida and L. Leonel Mendes, “Linear gfdm: A low out-of-band emission configuration for 5g air interface,” in 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), 2018, pp. 311–316.
- [15] C.-L. Tai, T.-H. Wang, and Y.-H. Huang, “An overview of generalized frequency division multiplexing (gfdm),” 2020.
- [16] E. Ozturk, E. Basar, and H. A. Cirpan, “Generalized frequency division multiplexing with index modulation,” in 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016, pp. 1–6.
- [17] N. H. Mahmood, H. Alves, O. A. López, M. Shehab, D. P. M. Osorio, and M. Latva-Aho, “Six key features of machine type communication in 6g,” in 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, pp. 1–5.