



Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant Matlab

Treball final de grau

Realitzat a

L'Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona

de la Universitat Politècnica de Catalunya

per

Meritxell Liria Masegosa

En compliment parcial

dels requisits per al grau de

Enginyeria en Sistemes de Telecomunicació

Tutora: Anna Umbert Juliana

Barcelona, Febrer 2016

Abstract

The recent increased use of mobile data and the development of new applications and services have been the motivations that 3GPP LTE develop the project. Shortly before 2010, the UMTS networks reach 85% of mobile subscribers. That is why we want to ensure the 3GPP LTE competitive advantage over other mobile technologies. Thus, a system able to significantly improve the user experience with full mobility, using Internet protocol (IP) to perform any type of data traffic end to end with a good quality of service (QoS) is designed and, just as voice traffic. Thus, LTE is expected to support different types of services including web browsing, FTP, streaming video, voice over IP.

In this project we have tried to analyse the characteristics of the physical layer of the LTE mobile communication systems using MATLAB. Medium access techniques (OFDMA and SC-FDMA), coding (Turbo Codes), MIMO techniques (Receive Diversity, Transmit Diversity, Spatial Multiplexing and Beamforming) are analysed and finally the link adaptation is analysed, with which we can achieve desired spectral efficiencies using techniques that change the transmission parameters in different channel conditions.

Resum

El recent augment de l'ús de dades mòbils i l'aparició de noves aplicacions i serveis han estat les motivacions per les quals 3GPP desenvolupés el projecte LTE. Poc abans de 2010, les xarxes UMTS arriben al 85% dels abonats de mòbils. És per això que LTE 3GPP vol garantir l'avantatge competitiu sobre altres tecnologies mòbils. D'aquesta manera, es dissenya un sistema capaç de millorar significativament l'experiència de l'usuari amb total mobilitat, que utilitzi el protocol d'Internet (IP) per realitzar qualsevol tipus de tràfic de dades d'extrem a extrem amb una bona qualitat de servei (QoS) i, de la mateixa manera el tràfic de veu. Així, amb LTE s'espera suportar diferents tipus de serveis incloent la navegació web, FTP, vídeo streaming, veu sobre IP.

En aquest projecte s'ha volgut analitzar les característiques de la capa física dels sistemes de comunicacions mòbils LTE utilitzant MATLAB. S'analitzen les tècniques d'accés al medi (OFDMA i SC-FDMA), la codificació (Codis Turbo), les tècniques MIMO (Diversitat en recepció, Diversitat en transmissió, Multiplexació Espacial i Beamforming) i per últim s'analitza l'adaptació d'enllaç, amb la qual podem aconseguir eficiències espectrals desitjades utilitzant tècniques que canvien els paràmetres de transmissió en diferents condicions del canal.

Resumen

El reciente aumento del uso de datos móviles y la aparición de nuevas aplicaciones y servicios han sido las motivaciones por las que 3GPP desarrollara el proyecto LTE. Poco antes de 2010, las redes UMTS alcanzan el 85% de los abonados de móviles. Es por ello que LTE 3GPP quiere garantizar la ventaja competitiva sobre otras tecnologías móviles. De esta manera, se diseña un sistema capaz de mejorar significativamente la experiencia del usuario con total movilidad, que utilice el protocolo de Internet (IP) para realizar cualquier tipo de tráfico de datos de extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS) y, del mismo modo el tráfico de voz. Así, con LTE se espera soportar diferentes tipos de servicios incluyendo la navegación web, FTP, video streaming, voz sobre IP.

En este proyecto se ha querido analizar las características de la capa física de los sistemas de comunicaciones móviles LTE utilizando MATLAB. Se analizan las técnicas de acceso al medio (OFDMA y SC-FDMA), la codificación (Códigos Turbo), las técnicas MIMO (Diversidad en recepción, Diversidad en transmisión, Multiplexación Espacial y Beamforming) y por último se analiza la adaptación de enlace, con la que podemos conseguir eficiencias espectrales deseadas utilizando técnicas que cambian los parámetros de transmisión en diferentes condiciones del canal.

Agraïments

Aquest projecte s'ha pogut dur a terme gràcies al suport de la tutora Anna Umbert, ja que m'ha ajudat a dur a terme aquest projecte, donant-me unes pautes de com fer-ho, explicant-me alguns conceptes que no quedaven clars, revisant i corregint errors en el treball, donant-me la seva opinió... Sobretot m'ha donat consells a l'hora d'encaminar el projecte i de com estructurar-lo. Gràcies per la teva dedicació i per haver estat sempre quan t'he necessitat.

També vull donar les gràcies als companys de la carrera amb els quals he viscut moltes experiències junts i m'han donat suport i consells sobre alguns aspectes del projecte.

Per últim, agrair als meus pares l'esforç que han fet perquè pogués estudiar aquesta carrera i els ànims i consells que m'han donat sempre per prendre bones decisions.

Història de revisions i registre d'aprovació

Revisió	Data	Objectiu
0	12/01/2016	Creació del document
1	18/01/2016	Revisió del document
2	21/01/2016	Correcció del document
3	24/01/2016	Revisió final

LLISTAT DE DISTRIBUCCIÓ DEL DOCUMENT

Nom	e-mail
Meritxell Liria Masegosa	meritxellliria@hotmail.com
Anna Umbert Juliana	annau@tsc.upc.edu

Escrit per:		Revisat i aprovat per:	
Data	12/01/2016	Data	25/01/2016
Nom	Meritxell Liria Masegosa	Nom	Anna Umbert Juliana
Posició	Autora del projecte	Posició	Tutora del projecte

Taula de continguts

Abstract	1
Resum	2
Resumen.....	3
Agraïments.....	4
Història de revisions i registre d'aprovació	5
Taula de continguts	6
Llista de figures.....	8
Llista de taules.....	10
1. Introducció.....	11
1.1 Objectius	12
1.2 Pla de treball, Work Packages, Fites i Diagrama de Gantt	12
2. Marc referencial	18
3. Metodologia.....	22
3.1. Aprenentatge característiques LTE.....	22
3.1.1 Tècniques d'accés al medi	22
3.1.2 Canals de LTE.....	24
3.1.3 Codificació.....	26
3.1.4 Tècniques MIMO	27
3.1.5 Adaptació d'enllaç	30
3.2. El programa MATLAB.....	31
4 Resultats.....	33
4.1 Exemple: Cadena de TX i RX.....	33
4.2 Exemple: Codis Turbo i convolucional.....	35
4.3 Exemples: Modes de transmissió MIMO en DL.....	37
4.3.1 Exemple: Mode 1 de transmissió	37
4.3.2 Exemple: Mode 2 de transmissió, Diversitat en transmissió	42
4.3.3 Exemple: Mode 4 de transmissió, Multiplexació espacial en llaç tancat	44
4.3.4 Exemple: Mode 3 de transmissió, Multiplexació espacial en llaç obert	46
4.4 Exemples: Adaptació d'enllaç.....	48
4.4.1 Exemples: Modulació adaptativa	50
4.4.2 Exemples: Modulació adaptativa i taxa de codificació	52



4.4.3	Exemples: Precodificació adaptativa.....	54
4.4.4	Exemples: MIMO adaptatiu.....	55
5	Part econòmica.....	56
6	Conclusions i línies futures.....	57
7	Bibliografia.....	58
	Glossari.....	59

Llista de figures

Figura 1. Pla de treball.....	13
Figura 2. Diagrama de Gantt.....	17
Figura 3. Evolució dels estàndards	19
Figura 4. Esquema de la propagació	21
Figura 5. Multiplexació de la freqüència en OFDM.....	22
Figura 6. Esquema de OFDM en transmissió i recepció	23
Figura 7. Comportament del OFDMA.....	23
Figura 8. Estructura de la trama.....	24
Figura 9. Relació entre els canals lògics, de transport i físics en l'enllaç descendent	25
Figura 10. Relació entre els canals lògics, de transport i físics en l'enllaç ascendent	25
Figura 11. Codificador convolucional	26
Figura 12. Codificador Turbo	27
Figura 13. Esquema de Diversitat en recepció.....	28
Figura 14. Esquema de Diversitat en transmissió	29
Figura 15. Esquema de Multiplexació espacial	29
Figura 16. Esquema de Conformació de feix (Beamforming)	30
Figura 17. Programa MATLAB.....	31
Figura 18. Esquema de la cadena de transmissió i recepció.....	33
Figura 19. Xarxa de recursos.....	34
Figura 20. Potència de la forma d'ona	35
Figura 21. Potència rebuda de la xarxa de recursos per a cada subportadora i el símbol.....	35
Figura 22. Estimació de la resposta de canal en freqüència	35
Figura 23. Xarxa de recursos equalitzada.....	35
Figura 24. BER Codificador Turbo i Convolucional	36
Figura 25. Diagrama de constel·lació SISO	38
Figura 26. Diagrama de constel·lació SIMO.....	39
Figura 27. Densitat espectral de potència pel cas SISO	40
Figura 28. Densitat espectral de potència pel cas SIMO.....	40

Figura 29. BER Mode 1 SISO	41
Figura 30. BER Mode 1 SIMO	41
Figura 31. Diagrama de constel·lació Mode 2	42
Figura 32. Densitat espectral de potència en el Mode 2.....	43
Figura 33. BER Mode 2 Diversitat en transmissió	43
Figura 34. Diagrames de constel·lacions Mode 4	44
Figura 35. Densitat espectral de potència en el Mode 4.....	45
Figura 36. BER Mode 4 Multiplexació espacial en llaç tancat	45
Figura 37. Diagrames de constel·lacions Mode 3	46
Figura 38. Densitat espectral de potència en el Mode 3.....	47
Figura 39. BER Mode 3 Multiplexació espacial en llaç obert	47
Figura 40. Paràmetres Modulació adaptativa	51
Figura 41. Paràmetres Modulació adaptativa i taxa de codificació	53
Figura 42. Paràmetres Precodificació adaptativa	54
Figura 43. MIMO adaptatiu	55

Llista de taules

Taula 1. Temps de càlcul del transceptor en funció del nombre d'iteracions	37
Taula 2. Resum dels codis MATLAB sobre l'adaptació d'enllaç en la categoria a	49
Taula 3. Resum dels codis MATLAB sobre l'adaptació d'enllaç en la categoria b	50
Taula 4. Modulació adaptativa.....	51
Taula 5. Modulació adaptativa i taxa de codificació	53
Taula 6. Precodificació adaptativa.....	54
Taula 7. MIMO adaptatiu.....	55

1. Introducció

Vivim en l'època d'una revolució de les dades de mòbils. Amb l'expansió del mercat de smartphones, tablets, i ordinadors portàtils, els usuaris demanen més serveis i aplicacions de sistemes de comunicacions mòbils que van molt més enllà de la simple veu i telefonia. El creixement de serveis de dades de mòbils i aplicacions com la navegació web, xarxes socials, música i vídeo streaming s'ha convertit en una força impulsora per al desenvolupament de la propera generació d'estàndards sense fil. Com a resultat, s'estan desenvolupant nous estàndards per proporcionar els tipus de dades i capacitat de xarxa necessària per donar suport a tot el món lliurement.

Els estàndards LTE (Long Term Evolution) i LTE-Advanced s'han desenvolupat per respondre a les exigències d'aquesta era i fer realitat l'objectiu d'aconseguir comunicacions mòbils de banda ampla globalment. Els usuaris volen una connexió de dades que descarregui i pugi a més velocitat, els fabricants i operadors volen un estàndard menys complex i que redueixi els costos, i cal assegurar la competitivitat del 3G (Third Generation) en el futur.

Per aquest fet s'ha volgut fer un projecte sobre l'anàlisi de les característiques de la capa física del sistema de comunicacions mòbils LTE, de manera didàctica per poder ensenyar mitjançant amb el programa MATLAB, algunes característiques interessants d'aquest estàndard. El MATLAB és un llenguatge de programació utilitzat pel desenvolupament d'algoritmes, anàlisi de dades, visualització i càlcul numèric. Aquest programa ens ajuda a simular els algoritmes de les funcions proporcionades pel llibre "**Understanding LTE with MATLAB**", el qual s'ha seguit per fer aquest projecte. També s'ha seguit uns exemples que ens proporciona la Toolbox del sistema LTE. Alguns algoritmes necessiten uns Toolboxes específics, que proporcionen funcionalitats matemàtiques especialitzades en sistemes de comunicacions, processament del senyal i pel sistema LTE.

El projecte ha estat proposat pel Grup de Recerca en Comunicacions Mòbils (GRCM) del departament de Teoria del Senyal i Comunicacions. En un futur es vol aprofitar els resultats obtinguts en aquest projecte per fer una pràctica per una assignatura del Màster de Telecomunicacions (MET) de la UPC. Per això, l'anàlisi de les característiques de LTE s'ha fet en forma de manual amb els codis de MATLAB i amb les seves explicacions corresponents, que es troba annex a aquest projecte.

Durant el progrés del projecte es va tindre una incidència amb la configuració de la IP de la llicència de la Toolbox del sistema LTE, que estava mal configurada, i per tant no funcionava l'eina. Una altra incidència que va haver-hi va ser que els codis de MATLAB del llibre que se segueix no funcionaven del tot bé, i per tant es va decidir descartar alguns exemples del llibre i mirar altres codis que ens proporciona la Toolbox del sistema LTE. Aquests fets han produït un lleuger retard alhora de seguir amb el progrés del projecte.

Aquest projecte consta de 6 apartats, en el qual el primer és aquest, l'apartat introductori del projecte on es declara el propòsit del projecte, els objectius, els requeriments i especificacions, el mètode i el procediment que s'utilitzarà i per últim el pla de treball amb les tasques, fites i el diagrama de Gantt. En el segon apartat, es descriu el context on es situa el projecte. En el tercer, s'explica la metodologia i el desenvolupament emprat en el projecte. En el quart, s'exposa els resultats obtinguts. En el cinquè, es fa una referència sobre la part econòmica d'aquest projecte el qual no aplica. I en l'últim apartat, tenim les conclusions i línies futures.

1.1 Objectius

- Recerca i aprenentatge dels conceptes de l'estàndard LTE. Diferents tècniques definides per les capes dependents de la xarxa.
- Analitzar les característiques del sistema LTE, mitjançant els codis MATLAB del llibre i els exemples de la Toolbox.
- Amb MATLAB simular els codis de les funcions donades.
- Interpretar els resultats obtinguts de les simulacions.
- Extreure característiques rellevants sobre el sistema LTE pel projecte.

1.2 Pla de treball, Work Packages, Fites i Diagrama de Gantt

A continuació es mostra el pla de treball del projecte amb les tasques, fites i el diagrama de Gantt.

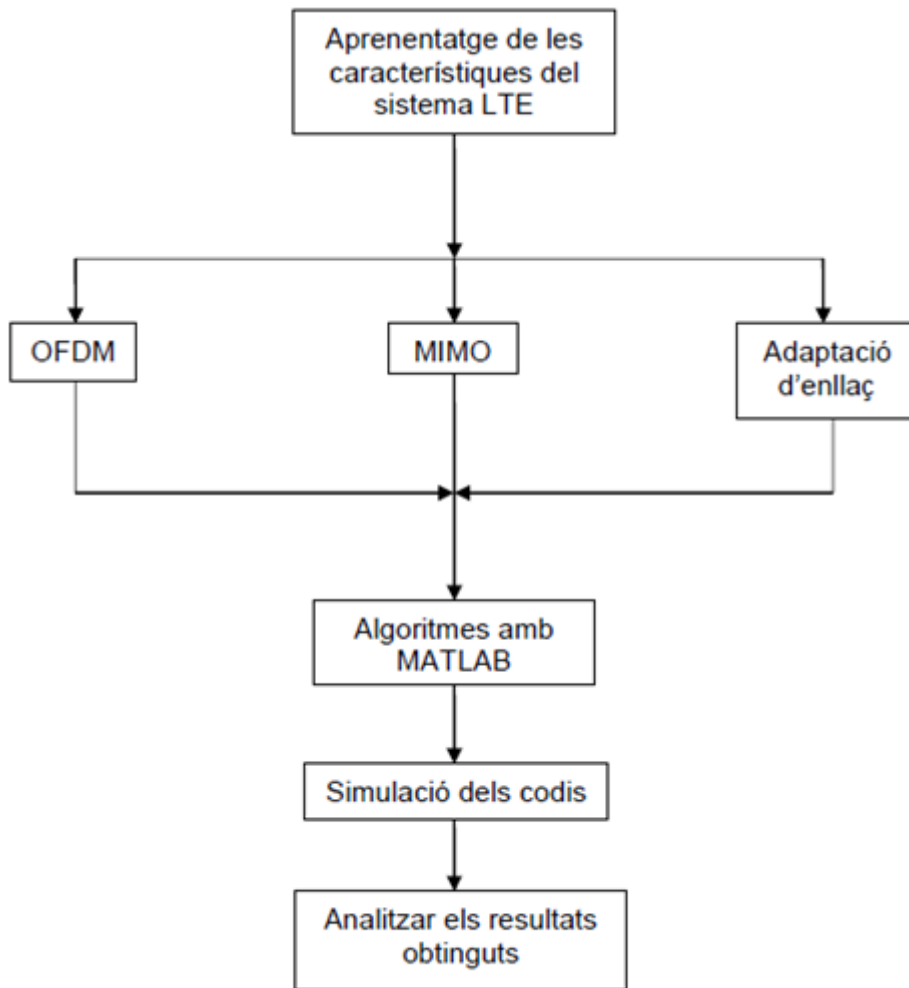


Figura 1 Pla de treball

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP1	
Component principal: Aprentatge característiques sistema LTE	Part 1 de 6	
Breu descripció: Entendre les característiques del sistema LTE, requeriments, estàndards, tecnologies, capes baixes, processament del senyal.	Data d'inici: 01/09/2015	
	Data finalització: 05/10/2015	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Entendre les característiques del sistema LTE, els seus estàndards i requeriments.	Entregables: Proposta projecte	Data:
Tasca interna T2: Redactar Proposta projecte.		05/10/2015

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP2	
Component principal: OFDM	Part 2 de 6	
Breu descripció: Veure en detall les característiques de la tecnologia OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).	Data d'inici: 05/10/2015	
	Data finalització: 19/10/2015	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Estudiar l'esquema de transmissió de la multiportadora utilitzat en l'estàndard LTE . Xarxa de recursos LTE. Tasca interna T2: Desenvolupament de l'enllaç de baixada de l'emissor en la transmissió OFDM en MATLAB. Tasca interna T3: Elements funcionals d'un sistema de transmissió OFDM , dissenyat per combatre els efectes de multipath. Tasca interna T4: Crear un model de transmissor-receptor en MATLAB pel mode de transmissió de l'enllaç de baixada d'una antena única del LTE estàndard. Tasca interna T5: Programar i simular codis MATLAB.	Entregables:	Data:

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP3	
Component principal: MIMO	Part 3 de 6	
Breu descripció: Veure en detall les característiques de la tecnologia MIMO (Multiple Input Multiple Output).	Data d'inici: 20/10/2015	
	Data finalització: 16/11/2015	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Examinar els models de canal MIMO. Tasca interna T2: Elements funcionals de l'esquema MIMO que són comuns entre transmetre diversitat i multiplexació espacial. Tasca interna T3: Crear amb MATLAB un model del transceptor per al segon, tercer, i quart mode de transmissió de l'estàndard LTE . Tasca interna T4: Realitzar tantes avaluacions qualitatives com mesures de rendiment BER. Tasca interna T5: Programar i simular codis MATLAB.	Entregables:	Data:

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP4	
Component principal: Adaptació d'enllaç	Part 4 de 6	
Breu descripció: Veure en detall les característiques de l'adaptació de l'enllaç.	Data d'inici: 17/11/2015	
	Data finalització: 01/12/2015	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Revisar les mesures de qualitat del canal necessàries per a realitzar les adaptacions.	Entregables: Revisió crítica	Data: 01/12/2015
Tasca interna T2: Algoritmes que implementen les adaptacions basades en les mesures de qualitat de canal .		
Tasca interna T3: Cadena de processament del senyal de la transmissió de la DCI.		
Tasca interna T4: Programar i simular codis MATLAB.		
Tasca interna T5: Redactar revisió crítica.		

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP5	
Component principal: Analitzar resultats obtinguts	Part 5 de 6	
Breu descripció: Amb les simulacions obtingudes dels algoritmes amb MATLAB, sobre el sistema LTE, analitzem els resultats amb l'ajuda de llibres sobre els sistemes LTE.	Data d'inici: 02/12/2015	
	Data finalització: 01/01/2016	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Analitzar resultats.	Entregables: Resultats	Data: 01/01/2016

Projecte: Anàlisi de les característiques del sistema de comunicacions mòbils LTE usant MATLAB	WP ref: WP6	
Component principal: Memòria final	Part 6 de 6	
Breu descripció: Realització de la memòria final del projecte.	Data d'inici: 02/01/2016	
	Data finalització: 25/01/2016	
	Esdeveniment inici:	
	Esdeveniment final:	
Tasca interna T1: Redactar memòria final.	Entregables: Memòria	Data: 25/01/2016

Fites

WP#	Tasca#	Breu títol	Fita /Entregable	Data (setmana)
1	2	Document Proposta projecte	Proposta projecte	Setmana 3
4	5	Document Revisió crítica	Revisió crítica	Setmana 11
5	1	Analitzar resultats obtinguts	Resultats	Setmana 15
6	1	Document Memòria final	Memòria final	Setmana 19

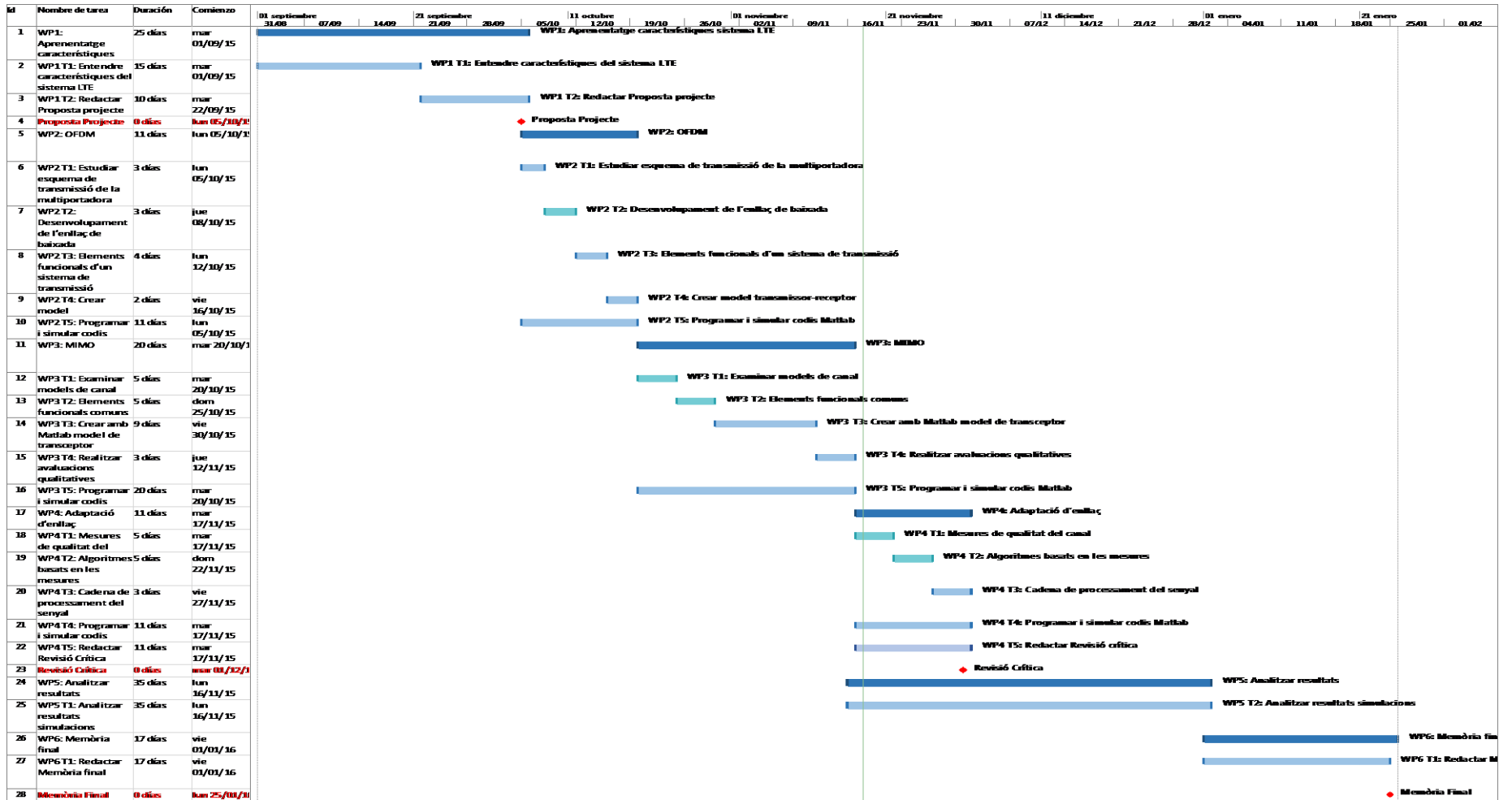


Figura 2 Diagrama de Gantt



2. Marc referencial

En aquest apartat es parla del context on se situa el projecte. Es dona una visió general del sistema LTE, els estàndards dels sistemes de comunicacions mòbils que hi ha i han evolucionat al llarg del temps, els requeriments de LTE, i les tecnologies disponibles en l'estàndard.

En les últimes dues dècades hem vist la introducció de diferents estàndards dels sistemes mòbils, des del 2G a 3G fins al present 4G.

Els sistemes de comunicacions mòbils digitals de segona generació (2G) es van introduir en la dècada de 1990. La tecnologia d'aquests sistemes van ser la commutació de circuits. El GSM (Global System for Mobile Communications) en Europa i el IS-54 (Interim Standard 54) a Amèrica del Nord estaven entre les primeres normes del 2G. Els dos eren basats en la tècnica d'accés múltiple TDMA. En TDMA, el canal, se subdivideix en un nombre de ranures de temps (slots) i múltiples usuaris comparteixen l'espectre en les ranures assignades. Els estàndards 2G tenien la característica del suport d'aplicacions de veu. L'estàndard GSM va evolucionar en el GPRS (Generalized Packet Radio Service) que va marcar la introducció de les xarxes sense fils Split-core, en la qual la tecnologia de commutació de paquets era compatible amb la transmissió de dades i tecnologia de commutació de circuits que suporta la transmissió de veu. La tecnologia GPRS va evolucionar a l'estàndard EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), el qual va introduir un esquema de modulació amb major taxa de dades.

Els estàndards 3G marquen el principi de la revolució de dades basades en paquets i la compatibilitat d'aplicacions d'Internet, com el correu electrònic, navegació web, missatges de text i altres serveis client-servidor. El 3GPP (Third Generation Partnership Project) és l'organisme de normalització que originalment administrava l'estàndard mòbil europeu i posteriorment va evolucionar en una organització d'estandardització mundial. 3GPP va començar a treballar en un esforç d'estandardització per complir uns objectius específics marcats per l'ITU (International Telecommunications Union). L'objectiu va ser la transició d'una tecnologia GSM, 2G basada en TDMA, a una tecnologia anomenada UMTS, 3G de banda ampla basada en CDMA. La UMTS representa un canvi significatiu en el temps de les comunicacions mòbils. Una altra aplicació important que ha estat una força impulsora per les taxes de dades i eficiència espectral és la xarxa d'àrea local sense fils (WLAN). L'objectiu principal del WLAN (Wireless Local Area Network) és proporcionar a usuaris en edificis amb confiança i connexions de xarxa d'alta velocitat, com les xarxes de comunicacions mòbils en IEEE. IEEE va establir l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) com una prometedora i innovadora tecnologia d'interfície d'aire.

Els estàndards 4G compten amb xarxes basades en paquets IP (Internet Protocol) i donen suport a la demanda d'aplicacions d'amplada de banda, com els serveis de vídeo mòbil. [1]

En la figura 3 observem els diferents estàndards que hi ha en les dues últimes dècades.

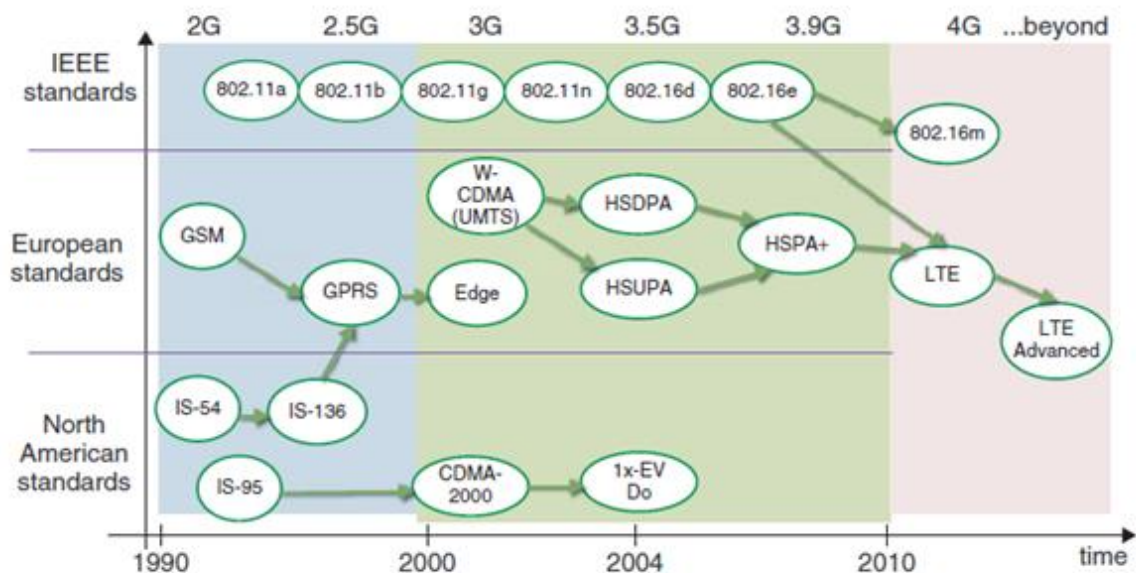


Figura 3 Evolució dels estàndards

LTE i LTE-Advanced es conceben com el punt d'inici per una transició suau cap a l'accés radio 4G, és a dir, LTE-Advanced és l'evolució de LTE. Els dos estàndards van ser desenvolupats pel 3GPP. Van heretar molt dels estàndards 3GPP anteriors (UMTS i HSPA). El treball de l'estàndard LTE va començar en l'any 2004 on va donar lloc a una xarxa de mòbil amb una arquitectura a gran escala. El procés de normalització de LTE es va completar en el 2008. Els requeriments de LTE cobreixen dos components fonamentals de l'arquitectura del sistema UMTS: E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) i EPC (Evolved Packet Core). Els objectius del sistema són els següents [2]:

- Sistema de millora de capacitat i cobertura
- Altes velocitats de dades de pic
- Baixa latència (pla de l'usuari i pla de control)
- Redueix els costos d'operació
- Suport multi-antena
- Operacions d'amplada de banda flexible
- Integració amb sistemes existents (UMTS, WiFi, etc)

Les tecnologies disponibles en el sistema LTE són el OFDM, MIMO (Multiple Input Multiple Output), codificació turbo i la tècnica dinàmica d'adaptació d'enllaç. Aquestes tecnologies ajuden a contribuir a la capacitat de l'estàndard LTE per satisfer les seves necessitats.

La interfície de LTE està basada en la tecnologia d'accés múltiple en l'enllaç descendent OFDM i per l'enllaç ascendent SC-FDM (Single Carrier Frequency Division Multiplexing). L'ús de OFDM proporciona uns avantatges significatius sobre tecnologies alternatives d'accés múltiple. Alguns avantatges són l'alta eficiència espectral i adaptabilitat per la transmissió de dades de banda ampla, i resistència a la interferència intersimbòlica causada pels esvaïments multicamí. LTE permet una millor estimació de canal a realitzar en el mòbil, que permeten les necessàries realimentacions per les adaptacions d'enllaç per l'estació base.[1]

Existeixen certes característiques bàsiques del comportament del mitjà de transmissió (canal ràdio) en les comunicacions mòbils, el que fa que els senyals rebuts a l'extrem del receptor quedin afectades de certa manera, afectant el rendiment de tot el sistema en general.

Aquestes característiques generalment són negatives, generant pèrdues (disminució de la potència, distorsió) en el senyal propagat. No obstant això, hi ha sistemes de múltiples antenes que poden minimitzar i fins i tot aprofitar aquests efectes per millorar el rendiment del sistema cel·lular.

Els tres efectes principals pels quals és afectat un senyal transmès en un sistema de comunicacions mòbils són:

- Pèrdues de Propagació
- Pèrdues per configuració del terreny
- Pèrdues per efecte multicamí

Aquestes últimes són les que explicarem en detall ja que són les pèrdues que analitzarem en els codis de MATLAB.

A la pràctica, hi ha reflexions i obstruccions de diversos objectes en el camí, les quals fan que diverses còpies del mateix senyal passin per diferents rutes i arribin al receptor de manera desfasada. En la figura 4 es mostra l'esquema de les pèrdues multicamí.

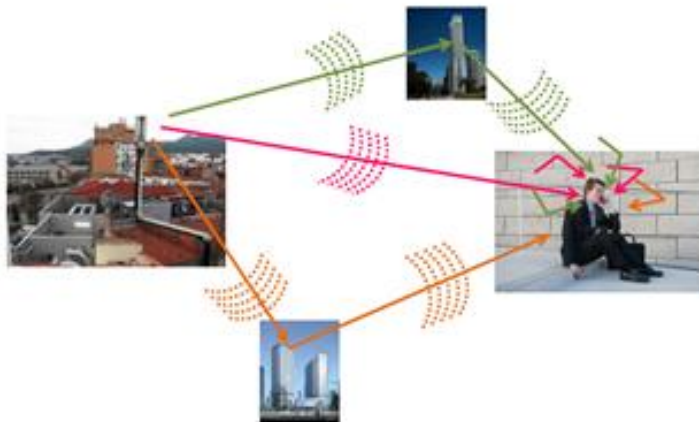


Figura 4 Esquema de la propagació multicamí

A les comunicacions mòbils, aquest tipus de resposta tendeix a ser de 2 tipus:

- **Dispersives en el temps (Esvaïment selectiu en freqüència):** Aquesta característica, coneguda com Delay Spread, es basa en el retard o diferència de temps en el qual arriben al receptor els diferents senyals producte dels múltiples camins de propagació que travessen. Es diu que és selectiu en freqüència a causa de que cadascuna de les senyals pateix una atenuació a una freqüència diferent depenent del trajecte de propagació recorregut. Si l'ample de banda del senyal transmès és menor a l'invers del Delay Spread, el canal es comporta de manera "plana" i els senyals patiran una atenuació semblant, no és dispersiu en el temps.
- **Dispersives en freqüència (Esvaïment selectiu en el temps):** Aquesta característica, coneguda també com a efecte Doppler, es basa en el canvi de freqüència que pateix un senyal producte que el receptor (terminal) es troba desplaçant-se a certa velocitat. Es diu que és selectiu en el temps pel fet que l'efecte és proporcional a la durada temporal del senyal transmès: Si té una durada major a l'invers de l'anomenada màxima freqüència Doppler es pot dir que el canal és selectiu en el temps (posseeix distorsió temporal); en cas contrari (amb una curta durada), els senyals patiran esvaïments similars.[3]

3. Metodologia

En aquest apartat s'exposa la metodologia emprada en el projecte. Aquest projecte és bastant teòric, per tant abans d'analitzar les característiques dels sistemes de comunicacions mòbils LTE amb el MATLAB, s'ha hagut d'analitzar el comportament de les diferents tècniques definides per les capes dependents de la xarxa. És a dir, la capa física, la capa d'enllaç i la capa de xarxa. Aquesta última en farem una breu referència.

3.1. Aprentatge característiques LTE

Les tècniques més interessants que hem identificat per analitzar amb MATLAB són les següents:

- Tècniques d'accés al medi: OFDMA i SC-FDMA.
- Els canals físics, canals de transport i els canals lògics.
- Codificació: Convolutional i Turbocodis.
- Tècniques MIMO: Diversitat en recepció, Diversitat en transmissió, Multiplexació espacial i Formació de feix (Beamforming).
- Adaptació d'enllaç

3.1.1 Tècniques d'accés al medi

En LTE s'utilitza la tècnica de transmissió OFDMA per l'enllaç descendent i la tècnica SC-FDMA per l'enllaç ascendent.

La tècnica de transmissió OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) constitueix un mecanisme de transmissió multi-portadora, que consisteix en multiplexar un conjunt de símbols d'una determinada modulació (QPSK, 16QAM o 64QAM) sobre un conjunt de subportadores. Gràcies a les propietats d'ortogonalitat d'aquestes subportadores, és possible efectuar la transmissió simultània de tots els símbols mantenint la capacitat de separació dels mateixos en recepció. Tal com es veu en la figura 5.

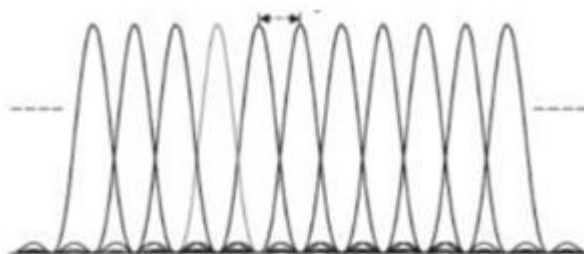


Figura 5 Multiplexació de la freqüència en OFDM

Així mateix, hi ha una variant de OFDM coneguda com OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), la qual és implementada en LTE com una forma d'assignar recursos als diferents usuaris a través del temps i la freqüència, com és mostrat en la figura 6.

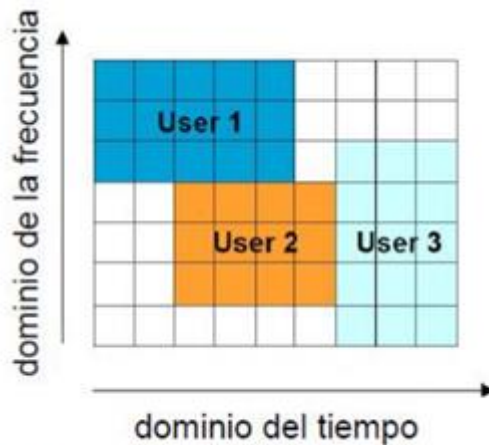


Figura 6 Esquema de OFDM en transmissió i recepció

En l'estàndard LTE s'indica que l'ample de banda de cadascuna de les portadores OFDM és de 15 KHz, formant cada 12 portadores l'anomenat bloc freqüencial (180 KHz), el qual és la unitat freqüencial mínima assignable a la xarxa. A més, a nivell temporal les transmissions estan dividides en trames de 10 ms, les quals estan formades per subtrames d'1 ms que al seu torn contenen 2 slots de 0.5 ms cadascun.

En LTE, a la unitat mínima d'assignació de recursos se la coneix com a bloc de recurs (Resource block), i està format per un bloc de freqüència amb un slot temporal, com es pot observar en la figura 7.

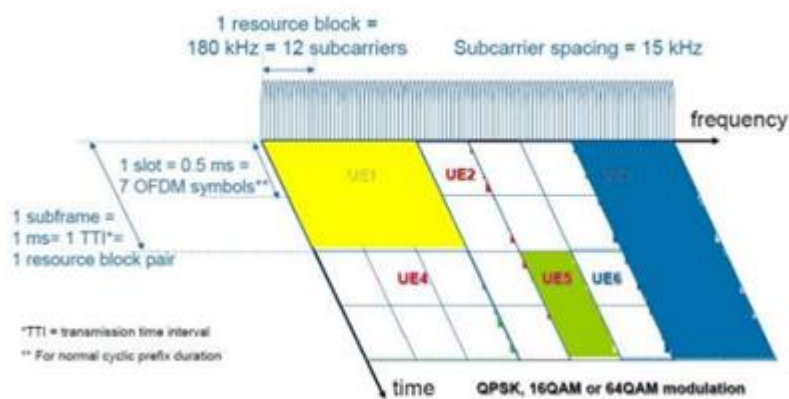


Figura 7 Comportament del OFDMA

En el cas d'un prefix cíclic normal amb 7 símbols OFDM per ranura, cada bloc de recursos es compon de 84 elements de recursos. En el cas d'un prefix cíclic estès amb 6 símbols OFDM per ranura, el bloc de recursos conté 72 elements de recursos. Els dos tipus de prefix cíclic es poden observar en la figura 8.

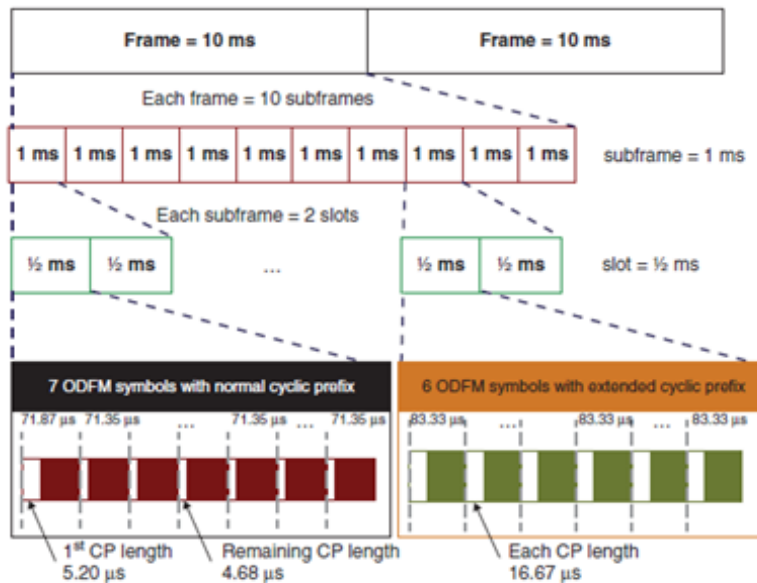


Figura 8 Estructura de la trama

La tècnica d'accés múltiple SC-FDMA, efectua una precodificació dels símbols a transmetre prèvia al procés de transmissió OFDM, el que permet reduir les variacions en la potència instantània. Aquesta característica d'aquesta tècnica d'accés és la que permet que el 3GPP la triï per l'enllaç ascendent, ja que els UE, necessitaran menys potència al transmetre. [1]

3.1.2 Canals de LTE

Cada canal de transport es caracteritza pel processament dels canals físics corresponents. La capa física ha de ser capaç de proporcionar l'assignació dinàmica de recursos tant per la variació en el tipus de dades i per la divisió de recursos entre els diferents usuaris. En la figura 9 es mostra els canals de transport i les seves relacions amb els canals físics en l'enllaç descendent i en la figura 10 en l'enllaç ascendent. El canal físic utilitzat per enviar la informació d'usuari en l'enllaç ascendent és el PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). Aquest canal només s'activa quan aquest té alguna cosa per transmetre en l'enllaç ascendent. En el cas del canal lògic de radiodifusió BCCH (Broadcast Control Channel), i dependent del tipus d'informació a transmetre, aquest canal pot transmetre utilitzant bé el canal de transport de radiodifusió BCH (Broadcast Channel), o bé el canal compartit DL-

SCH (Downlink Shared Channel). El canal de transport compartit (DL-SCH) s'utilitza no només per transportar dades d'usuari DTCH (Dedicated Traffic channel) sinó també senyalització comú CCCH (Common Control Channel) i dedicada DCCH (Dedicated Control Channel). Això és així ja que a diferència dels sistemes de comunicacions mòbils previs, el sistema LTE no defineix canals físics ni de transport dedicats. És a dir, només quan l'usuari té dades o senyalització a rebre o bé la xarxa necessita enviar informació de control comú, s'activa el canal compartit i per tant no es malgasten recursos mantenint actius canals dedicats que no sempre s'utilitzen.[1]

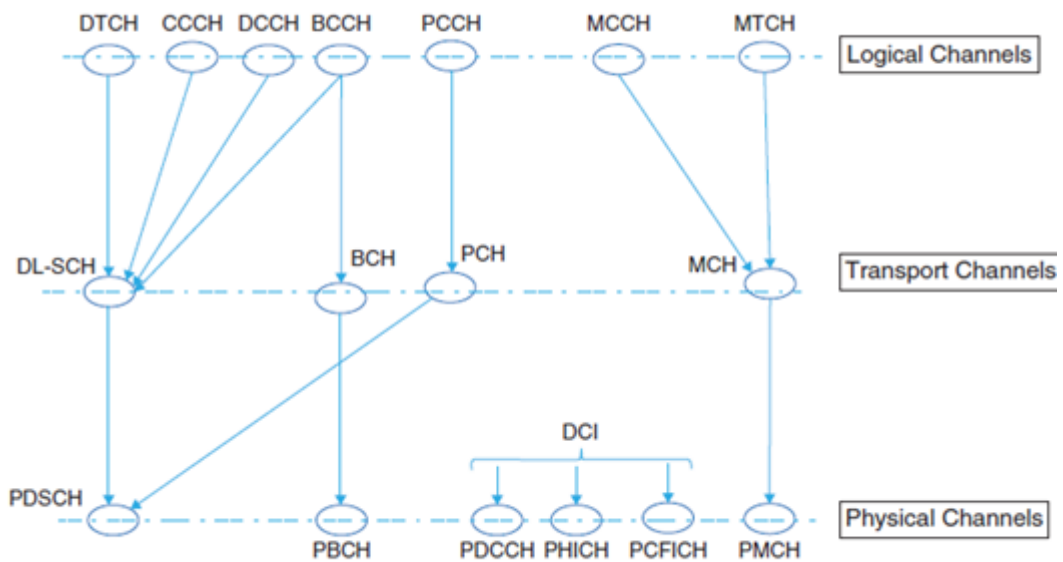


Figura 9 Relació entre els canals lògics, de transport i físics en l'enllaç descendent

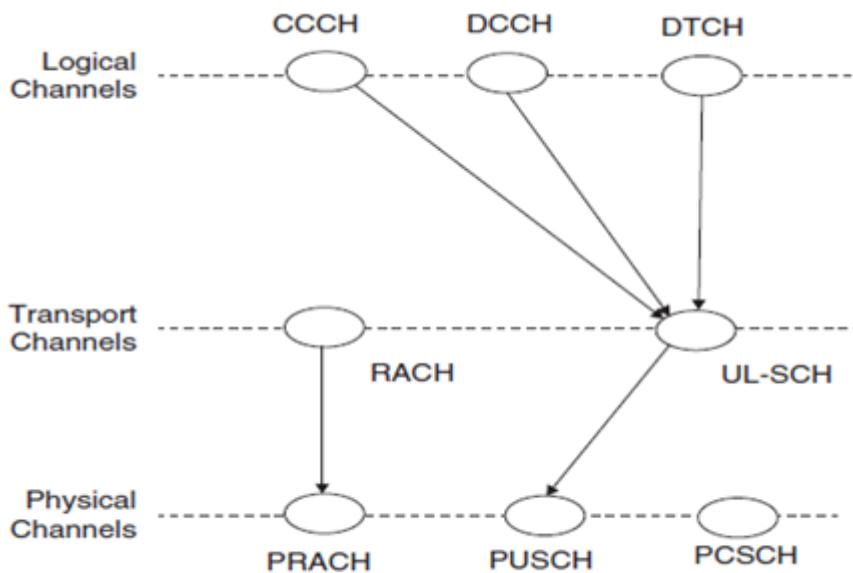


Figura 10 Relació entre els canals lògics, de transport i físics en l'enllaç ascendent

3.1.3 Codificació

Els codis convolucionals constitueixen l'esquema de codificació de canal més bàsic que s'implementa en els sistemes mòbils de nova generació. El principi de funcionament dels codis convolucionals es basa en l'alimentació d'una sèrie de registres de desplaçament amb una seqüència de símbols d'entrada a codificar, els quals poden ser bits o grups de bits. En cada instant de temps, el codificador calcula les sortides mitjançant sumes mòdul-2 del contingut de part dels registres de desplaçament i de l'entrada en aquest instant. En funció del mètode emprat per inicialitzar la memòria (els registres de desplaçament) del codificador, els codis convolucionals es divideixen en codis zero tail i els codis tailbiting. En la figura 11 es mostra el codificador convolucional i la transició dels trellis associada.

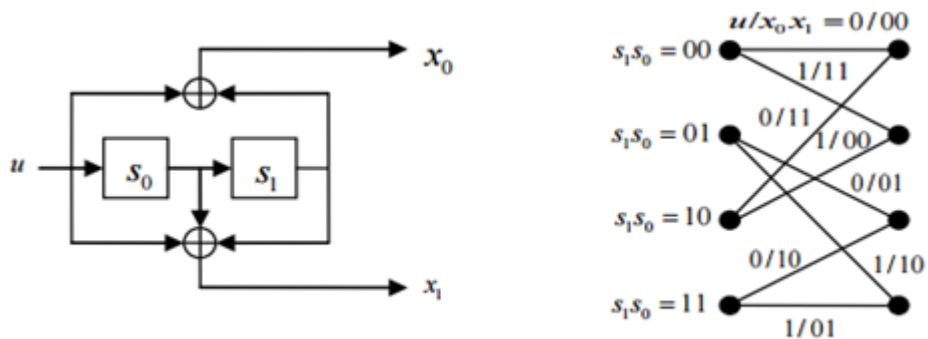


Figura 11 Codificador convolucional

Els turbo codis s'empren en la gran majoria dels sistemes mòbils de nova generació, entre els que s'inclouen LTE i WiMAX, per la seva elevada capacitat correctora d'errors i la seva moderada complexitat. Els turbo codis, estan formats en el transmissor per dos codificadors convolucionals treballant en paral·lel i separats per un entrellaçador. D'aquesta manera cada bloc de dades es codifica dues vegades: la primera d'elles alimentant el codificador convolucional amb la seqüència de bits original i la segona alterant l'ordre de la mateixa amb el entrellaçador. La descodificació es realitza amb dos descodificadors SISO (Single Input Single Output), un per a cadascuna de les versions codificades de les dades, els quals es van passant iterativament les estimacions soft dels bits d'informació codificats. En la figura 12 es mostra el diagrama de blocs del codificador turbo.[5]

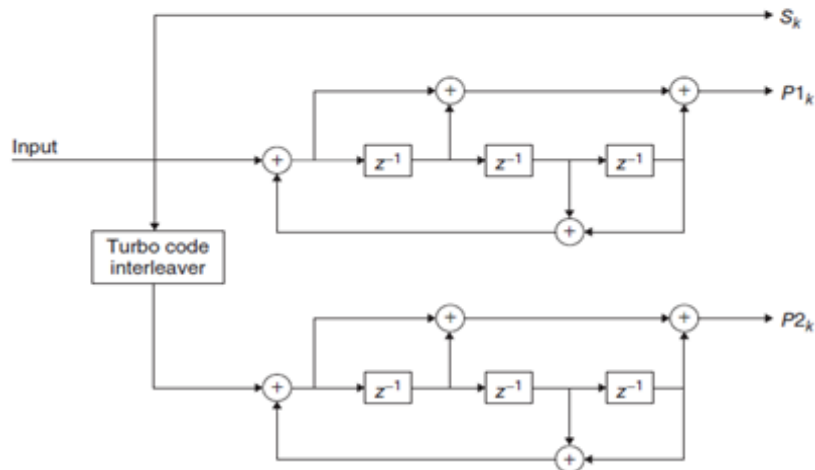


Figura 12 Codificador Turbo

3.1.4 Tècniques MIMO

La tècnica MIMO (Multiple Input Multiple Output) és un conjunt de tècniques relacionades amb l'ús de múltiples antenes en comunicacions sense fil. Això suposa afegir una dimensió espacial addicional que pot aprofitar la formació de canals estadísticament independents originats pel multitrajecte i mitigar l'efecte del mateix, aconseguint un increment substancial de l'eficiència espectral. Aquesta millora porta a les modernes tecnologies sense fils a contemplar l'ús de MIMO per augmentar la seva taxa de transmissió.

Hi ha diverses tècniques MIMO, el rendiment depèn de l'escenari. Es podran combinar per aconseguir la major eficiència possible. Indicar que no en totes les tècniques és necessari conèixer el canal, però com millor sigui la seva estimació millors prestacions es podran assolir. Per qüestions d'eficiència algunes tecnologies com LTE utilitzen un conjunt predeterminat de matrius per a la caracterització del canal. Les tècniques MIMO són:

- **Diversitat en recepció:** És la configuració d'antena múltiple més simple i més comú, es pot veure el seu esquema en la figura 13. Aquesta configuració es refereix com rebre diversitat. L'algoritme més utilitzat en rebre diversitat és el MRC (Maximum Ratio Combining). S'utilitza en el mode 1 de transmissió en l'estàndard LTE, que es basa en una sola antena en transmissió. En el receptor es poden utilitzar dos tipus de mètode de combinació: MRC i Selecció de la combinació (SC). En MRC, es combinen els múltiples senyals rebuts per trobar l'estimació més probable del senyal transmès. En SC (Selection Combining), només el senyal rebut amb la SNR més alta s'utilitza per

estimar el senyal transmès. MRC és una bona tècnica MIMO quan, en un canal amb esvaïments, el número de senyals interferents és gran i tots els senyals mostren potències similars. Com a tal, MRC funciona millor en la transmissió sobre un canal pla de esvaïment. En la pràctica, la majoria dels canals de banda ampla, estan subjectes a la dispersió de temps, resultant en una resposta esvaïment selectiu de freqüència.

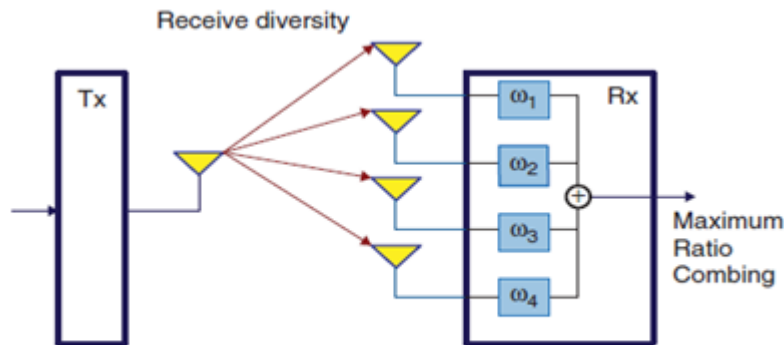


Figura 13 Esquema de diversitat en recepció

- **Diversitat en transmissió:** Es basa en la transmissió de la mateixa informació a través de múltiples antenes de forma simultània, de manera que els senyals recorrin diferents camins de propagació i s'obtingui una millora a nivell de recepció, augmentant la robustesa del sistema i contribuint amb un augment tant en la qualitat del senyal com en la capacitat del canal.

Aquest tipus de tècnica MIMO es refereix generalment com a bloc de codificació espai - temps (STBC). En la modulació de STBC (Space Time Block Coding), els símbols s'assignen en els dominis de temps i espai per capturar la diversitat oferta per l'ús de múltiples antenes de transmissió. SFBC (Space Frequency Block Combining) és una tècnica relacionada amb STBC que és seleccionat com la tècnica de diversitat de transmissió en l'estàndard LTE. La principal diferència entre les dues tècniques és que en SFBC la codificació es realitza en l'antena (espai) i en el domini de la freqüència en lloc de l'antena (espai) i en el domini de temps, com és el cas de STBC. En la figura 14 es mostra el diagrama de bloc de SFBC.

En LTE, el segon mode de transmissió es basa en transmetre diversitat. SFBC i FSTD (Frequency Switched Transmit Diversity) s'utilitzen per a la transmissió de dues i quatre antenes. Una altra tècnica MIMO és el multiplexat espacial que contribueix directament a tenir una taxa de dades més gran en l'estàndard LTE.

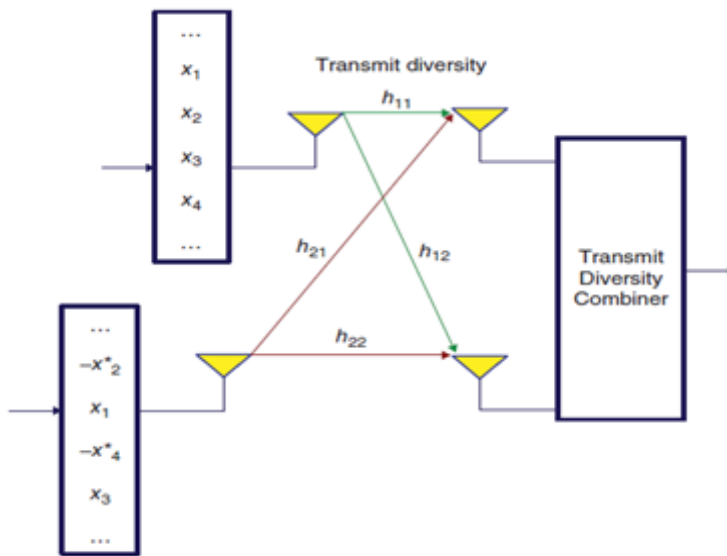


Figura 14 Esquema de diversitat en transmissió

- Multiplexació espacial:** Es basa en la transmissió de diferents fluxos de dades o diferent informació a través de diversos camins de propagació, incrementant d'aquesta manera la capacitat del canal i la taxa de transmissió de la informació, però sense aportar cap augment en la qualitat o relació senyal a soroll del senyal (SNR). En aquest sistema les antenes han de posseir una baixa correlació mútua, és a dir, estar prou separades entre elles o posseir diferents direccions de polarització. Podem observar l'esquema de la multiplexació espacial en la figura 15.

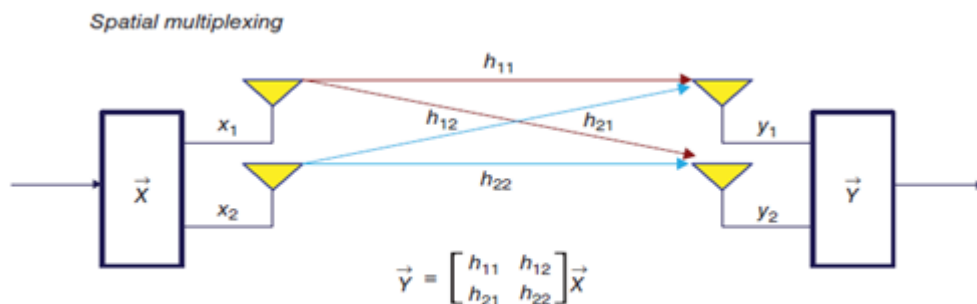


Figura 15 Esquema Multiplexació espacial

- Conformació de feix (Beamforming):** Es basa en el modelat que les antenes poden donar-li al seu feix de radiació perquè connecti amb una direcció determinada i d'aquesta manera concentrar tota la potència en aquest feix, aconseguint un major abast. Aquest tipus de tècnica pot ser usada tant per a la transmissió com per a la recepció dels senyals, i generalment les antenes en aquest cas experimenten una alta correlació mútua, pel que són comunament conegudes com arrays d'antenes. Aquest sistema millora la qualitat del senyal i contribueix amb un augment en la capacitat del canal. Aquest tipus de formació de feix s'utilitza en el mode 7 de transmissió

MIMO. Aquesta tècnica no la estudiarem en detall. En la figura 16 es mostra l'esquema.[1]

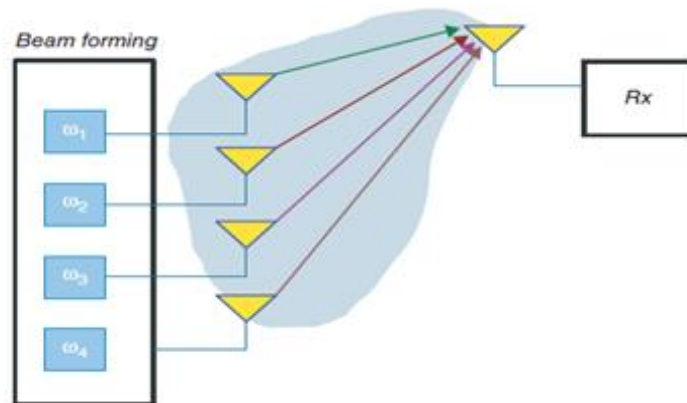


Figura 16 Esquema de Conformació de feix (Beamforming)

3.1.5 Adaptació d'enllaç

L'adaptació d'enllaç es defineix com un conjunt de tècniques per canviar i adaptar els paràmetres de transmissió d'un sistema de comunicacions mòbils per respondre millor a la naturalesa dinàmica dels canals de comunicació. Depenent de la qualitat del canal, podem utilitzar diferent modulació i tècniques de codificació (modulació adaptativa i codificació), canviar el nombre d'antenes de transmissió o de recepció (MIMO adaptatiu) i fins i tot canviar l'ample de banda de transmissió (ample de banda adaptable).

Estretament relacionada amb l'adaptació d'enllaç es els algoritmes de scheduling dependent en un sistema de comunicació mòbil. Scheduling aborda la qüestió de com compartir els recursos ràdio entre diferents usuaris per aconseguir utilitzacions de recursos més eficients. En general, hem de minimitzar la quantitat de recursos assignats a cada usuari o coincidir amb els recursos necessaris per al tipus i prioritat de les dades de l'usuari. El canal dependent del scheduling pretén donar cabuda a tants usuaris com sigui possible, mentre satisfà els requisits de la millor qualitat de servei que poden existir basat en la condició de canal en cada instant.

Per activar els canvis dinàmics a MCSs (Modulation and Coding Schemes) i per a un correcte funcionament dels sistemes MIMO, l'estàndard LTE proporciona mecanismes que permeten a la informació relativa a les característiques del canal a ser mesurades pel terminal mòbil (UE). Aquesta informació es realimenta a l'estació base (eNodeB) per ajudar amb el scheduling i l'adaptació d'enllaç. En el receptor mòbil, es generen i es transmeten a l'estació base tres tipus d'informe d'estat de canal:

- **CQI (Channel Quality Indicator):** És una mesura de la qualitat del canal ràdio de l'enllaç descendent que especifica la millor constel·lació de modulació i taxa de codificació per a què coincideixi amb la qualitat de l'enllaç.
- **PMI (Precoder Matrix Indicator):** És una mesura que indica el millor conjunt de matrius de precodificació per al seu ús en llaç tancat d'usuaris d'un o diversos modes de multiplexació espacial de la norma LTE.
- **RI (Rank Indicator):** Assenyala el nombre de capes de transmissió útils que poden ser utilitzats pel transmissor en els modes de multiplexació espacial.

3.2. El programa MATLAB

MATLAB és un llenguatge de programació àmpliament utilitzat per al desenvolupament d'algoritmes, anàlisi de dades, visualització i càlcul numèric. Moltes de les seves característiques i capacitats són perfectes per a la modelització de sistemes sense fil:

- Té un programa interactiu
- Proporciona un accés transparent a les dades i als algoritmes
- Té eines per a la visualització, desenvolupament d'algoritmes i anàlisi de dades

En la figura 17 observem com és el programa MATLAB.

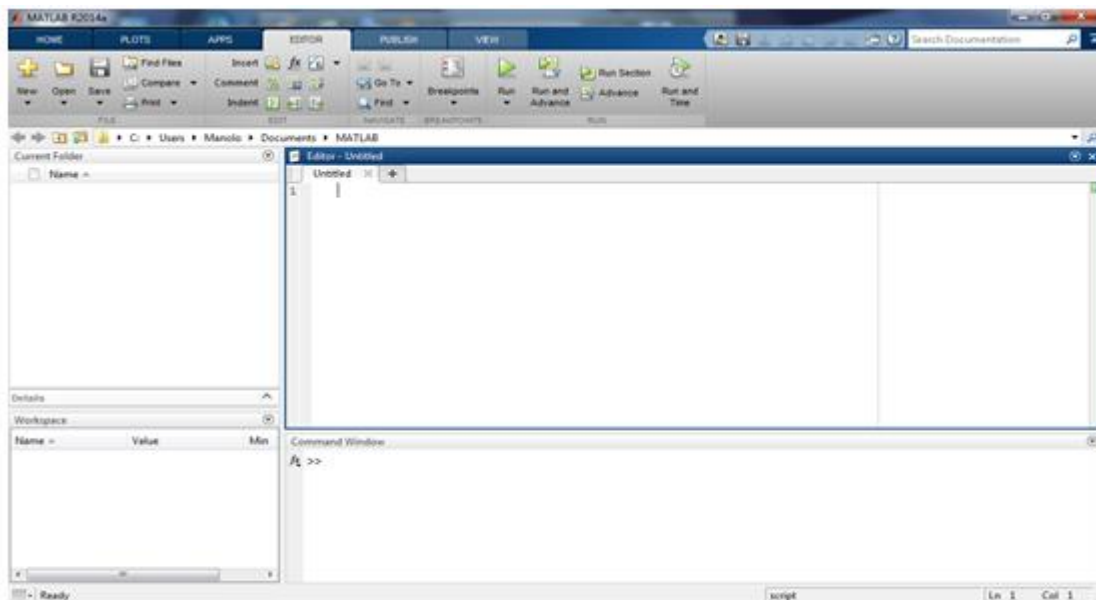


Figura 17 Programa MATLAB

En aquest projecte també s'ha utilitzat unes Toolboxes de MATLAB. Les Toolboxes proporcionen funcionalitats matemàtiques especialitzades en àrees com processament de senyals i comunicacions. Complementen la biblioteca central de MATLAB i proporcionen funcions i objectes específics que acceleren el procés de l'aplicació dels algoritmes i sistemes de modelatge i construcció. S'utilitzen 3 Toolboxes diferents en el sistema [1]:

- DSP System Toolbox
- Communications System Toolbox
- LTE Toolbox

Amb els codis de MATLAB que ens proporciona el llibre que se segueix per dur a terme aquest projecte, s'estudien i es simulen. Un cop tenim les simulacions, analitzem i comparem les característiques del sistema LTE.

4 Resultats

En aquest apartat es mostra les simulacions obtingudes dels codis MATLAB que es troben en el manual annex a aquest projecte. Analitzem i comparem els diferents resultats obtinguts segons el nombre d'iteracions en codis turbo, diagrames de constel·lació de les diferents modulacions abans i després de l'equalització. Comparem la BER (Bit Error Rate) i la densitat espectral de potència del senyal transmès i rebut dels diferents modes de transmissió del MIMO. I finalment analitzem els resultats anteriors aplicant adaptació d'enllaç, on veiem que modificant els paràmetres de transmissió podem aprofitar recursos d'ample de banda més eficaçment.

4.1 Exemple: Cadena de TX i RX

El primer codi del manual és un exemple molt senzill, on es mostra la cadena de transmissió i recepció d'un sistema LTE, com es pot veure en la figura 18. Aquest esquema ens ajuda a entendre les diferents etapes que es produeix en una transmissió. A més, és la que segueixen tots els codis que s'expliquen en el manual del projecte.

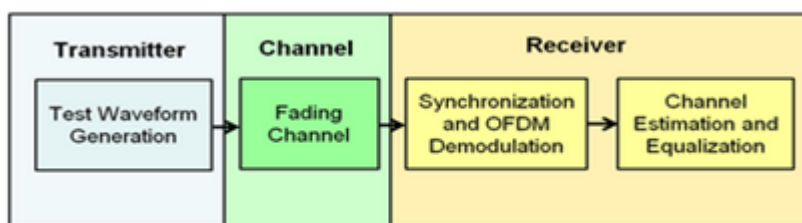


Figura 18 Esquema de la cadena de transmissió i recepció

Primerament, en el transmissor es genera la informació que serà transmesa, després es genera la transmissió a través d'un model de propagació del canal amb esvaïments. Un cop en el receptor, es produeix la sincronització de trama i la desmodulació OFDM. Després s'estima el canal i el soroll, i finalment es realitza l'equalització de la xarxa de recursos rebuda pel mètode de MMSE (Minimum Mean Square Error).

En les següents figures es mostren els diferents processos d'una transmissió com hem explicat.

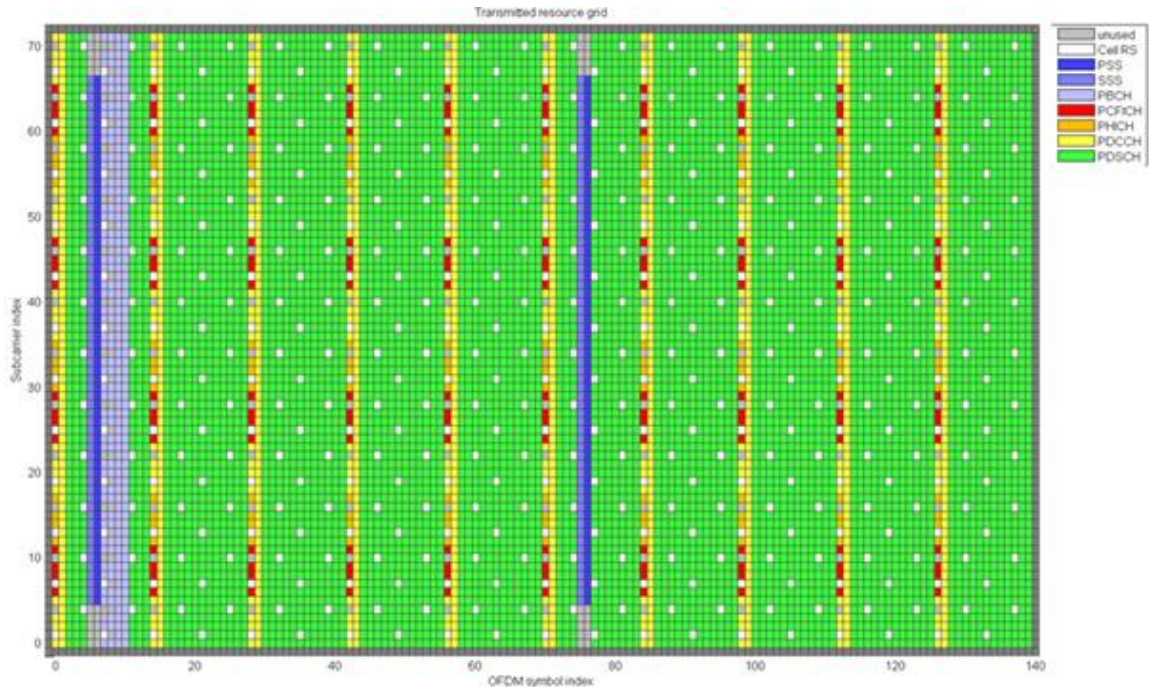


Figura 19 Xarxa de recursos

Com observem en la figura 19, el conjunt de recursos que es transmetrà és una matriu en la que els seus elements són símbols modulats. L'eix y representa la subportadora alineada al llarg de la dimensió de freqüència. En canvi, l'eix x representa els símbols OFDM alineats al llarg de la dimensió del temps. Els tipus de senyals que formen la xarxa de recursos de l'enllaç descendent són:

- Dades d'usuari (PDSCH)
- Senyals de referència específiques de cèl·lules (CSR o pilots)
- Senyal de sincronització primària (PSS) i secundària (SSS)
- El canal físic PBCH
- El canal de control PDCCH
- El canal físic PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel)
- El canal físic PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel)

La col·locació de la informació del canal de control PDCCH (Physical Downlink Control Channel) al principi de cada subtrama ajuda al receptor a desxifrar paràmetres de processament abans de que el sistema inicia la descodificació de les dades d'usuari en la subtrama. El canal físic PBCH (Physical Broadcast Channel), és un sistema d'informació requerit pel terminal per poder accedir a la xarxa a la recerca de cèl·lules. L'estructura de la xarxa depèn de 3 paràmetres: l'índex de la subportadora (eix y), l'índex dels símbols

OFDM (eix x) i l'índex de la subtrama dins d'una trama. El PCFICH conté la informació necessària per descodificar la informació del PDCCH.[6]

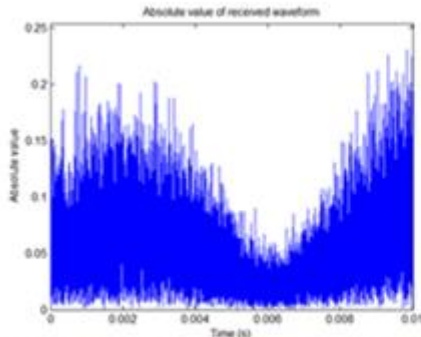


Figura 20 Potència de la forma d'ona rebuda

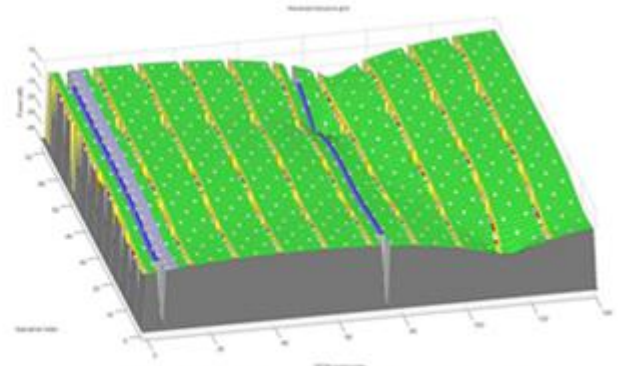


Figura 21 Potència rebuda de la xarxa de recursos per a cada subportadora i el símbol

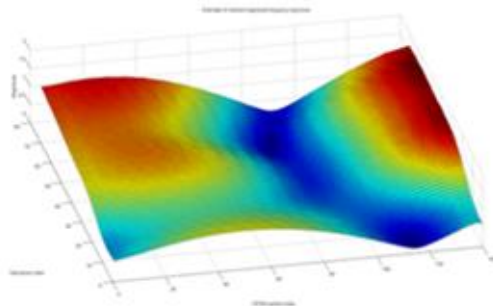


Figura 22 Estimació de la resposta del canal en freqüència

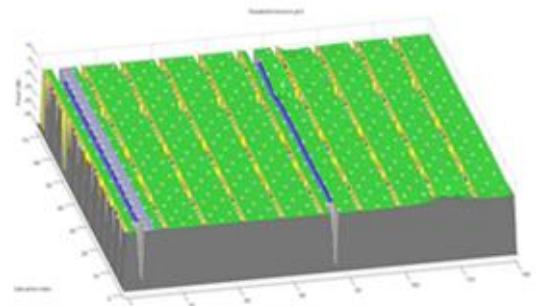


Figura 23 Xarxa de recursos equalitzada

4.2 Exemple: Codis Turbo i convolucional

Un altre codi MATLAB interessant de veure, és sobre l'ús del codis turbo en el sistema LTE. El rendiment de qualsevol codificador turbo depèn del nombre d'iteracions realitzades en l'operació de descodificació. Això vol dir que per a un codificador turbo donat, el rendiment de la BER és successivament millor amb un major nombre d'iteracions. La funció de MATLAB **chap4_ex03_niter**, mostra el rendiment de la BER en funció del nombre d'iteracions.

Per comparar el rendiment d'un codificador turbo amb la d'un codificador convolucional, també executem una funció anomenada **chap4_ex03_viterbi.m**, que utilitza un codificador convolucional de taxa 1/3, un descodificador de Viterbi i desmodulació amb decisió soft.

En la figura 24 es compara el rendiment de la BER d'un descodificador turbo quan s'utilitzen 1, 3 o 5 iteracions de descodificació amb la d'un descodificador de Viterbi típic amb la mateixa taxa de codificació.

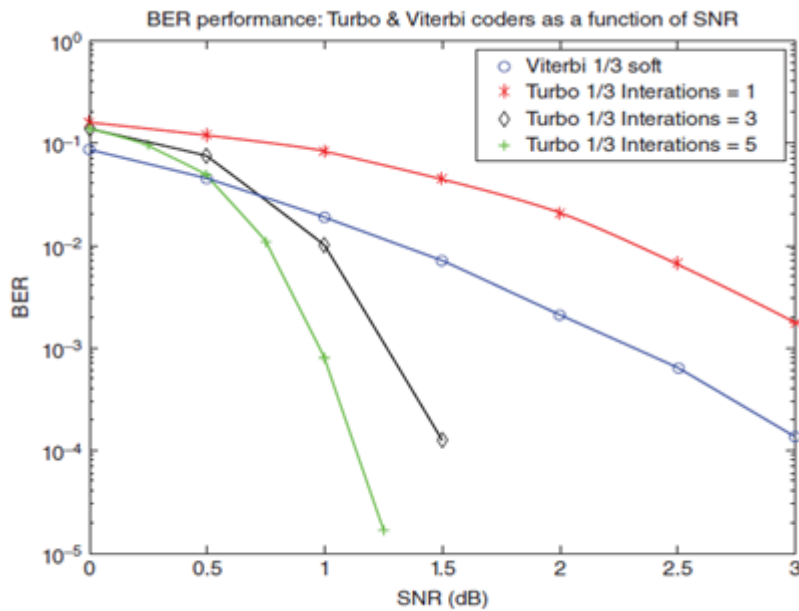


Figura 24 BER codificador Turbo i Convolucional

Quan augmentem el nombre d'iteracions de 1 a 3 i després a 5, veiem que la forma de la corba BER reflecteix la qualitat a prop del grau òptim d'un descodificador turbo. La corba mostra un pendent després d'un cert valor de SNR (Signal to Noise Ratio).

Per exemple, amb 5 com a nombre màxim d'iteracions, el descodificador turbo combinat amb QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) i un demodulador amb decisió soft és capaç d'arribar a un valor de BER igual a $2e^{-4}$ amb un valor de SNR de 1,25 dB.

Aquest perfil de rendiment per a la codificació turbo pot explicar per què la codificació turbo ha estat seleccionada com el mecanisme de codificació de canal obligatori per a dades d'usuari en l'estàndard LTE.

En la taula 1 podem observar el temps de càlcul del transceptor en funció del nombre d'iteracions. El temps de càlcul és una estimació de la complexitat computacional de la codificació turbo i descodificació de les operacions.

Maximum number of iterations in turbo coding	Elapsed time (s)
1	5.83
2	8.54
3	11.27
4	13.66
5	16.41
6	18.96

Taula 1 Temps de càlcul del transceptor en funció del nombre d'iteracions

Com era d'esperar, la complexitat i així el temps necessari per a les operacions de descodificació és proporcional al nombre d'iteracions.

4.3 Exemples: Modes de transmissió MIMO en DL

A l'estàndard LTE es proposen diferents esquemes de transmissions multi-antena, corresponents als modes de transmissió. Existeixen 9 modes de transmissió per l'enllaç descendent. Els següents exemples de MATLAB tracten sobre els quatre primers modes de transmissió del MIMO. El mode 1 rep amb diversitat i el mode 2 es basa en transmetre amb diversitat. Els modes 3 i 4 són implementacions d'usuari únic de multiplexat espacial basada en precodificació en llaç obert i en llaç tancat, respectivament.

4.3.1 Exemple: Mode 1 de transmissió

El mode 1 es basa en la transmissió d'una sola antena. Es comparen les dues variants d'aquest mode:

- **SISO:** Sistemes que posseeixen una antena tant per a la transmissió com per a la recepció. És el sistema més simple, ja que no s'utilitzen múltiples antenes en cap extrem del sistema.
- **SIMO:** Sistemes que posseeixen només una antena en transmissió (per tant, un sol flux de dades) contra múltiples antenes en recepció. Aquest tipus de sistema és un dels més comunament usat en les tecnologies sense fils a causa que està associat a tècniques de diversitat espacial i conformació de feixos. Solen ser trobats en l'actualitat en els enllaços ascendents de les comunicacions mòbils (múltiples antenes en l'estació base), ja que permeten que amb l'ús d'una sola antena en el terminal mòbil es pugui aconseguir a

través de la diversitat a recepció o conformació de feixos, una major robustesa en el sistema.

Les funcions de MATLAB, **commlteSISO_step** i **commlteSIMO_step** conté les operacions en el transceptor (transmissor, canal i receptor). La cadena del processament del senyal en el transmissor és una combinació de DLSCH i PDSCH. El modelatge del canal inclou una combinació de canals d'esvaïments i canal AWGN (Additive White Gaussian Noise). L'operació del receptor, que inverteix les operacions del PDSCH, i finalment, les operacions inverses del DLSCH. Pel cas SIMO, la cadena de processament del senyal és molt similar al cas SISO, amb l'excepció que emprà múltiples antenes en recepció. El modelatge de la diversitat de recepció no canvia el transmissor però introdueix molts canvis per les operacions de modelatge del canal i del receptor. Després de l'operació del transmissor, el canal de esvaïments processa mostres d'una única antena de transmissió. No obstant això, depenent del nombre d'antenes de recepció, s'aplica el modelatge de canal per a cada enllaç (parell transmissor-receptor) per separat.

Per examinar els efectes de l'equalització pels dos casos (SISO i SIMO), podem visualitzar el diagrama de constel·lació de les dades d'usuari recuperades en el receptor abans i després de l'equalització.

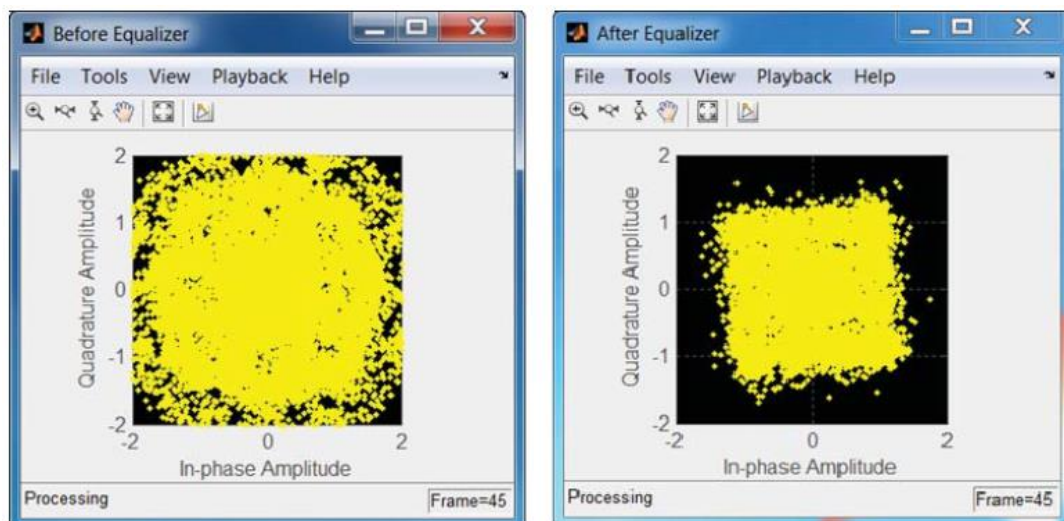


Figura 25 Diagrama de constel·lació SISO

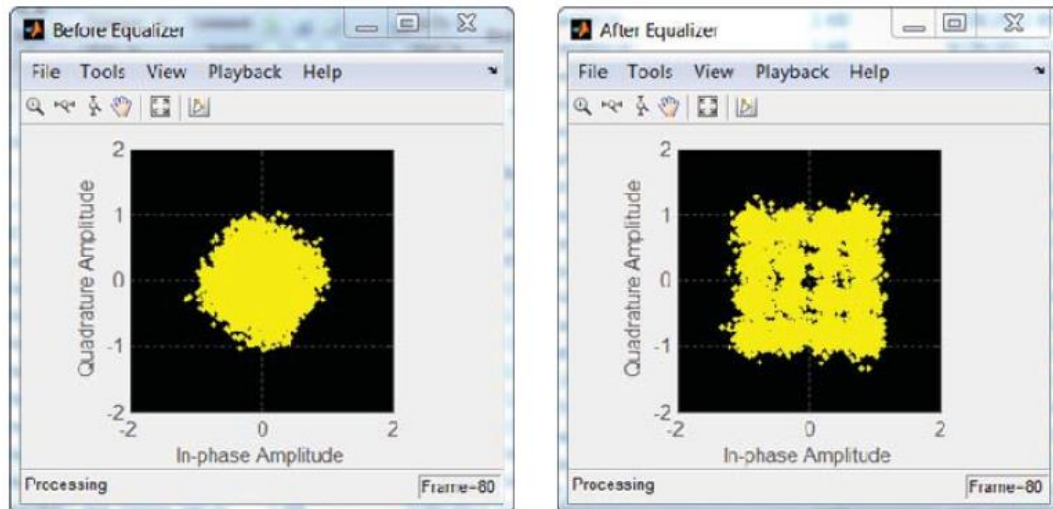


Figura 26 Diagrama de constel·lació SIMO

La figura 25 il·lustra els diagrames de constel·lació del SISO i la figura 26 les constel·lacions del SIMO, la qual cosa demostra que l'equalitzador pot compensar els efectes dels esvaïments de canal (figura de l'esquerra) i els resultats en una constel·lació que s'assembla més a la constel·lació de la modulació 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) utilitzat en aquest experiment (figura de la dreta). Pel cas del transceptor OFDM SIMO es veu com compensa l'efecte d'esvaïments multicamí. La constel·lació danyada s'ha girat cap enrere i s'ha escalat (abans de l'equalització) a una constel·lació que adequadament pot ser demodulada (després de l'equalització).

Per examinar l'eficàcia del receptor OFDM en la lluita contra els efectes del esvaïments multicamí, podem mirar la densitat espectral de potència del senyal transmès (senyal verd) i els senyals rebuts abans (senyal vermell) i després (senyal blau) de l'equalització. La figura 27 il·lustra els espectres del senyal transmès, el senyal rebut abans d'equalització, i el senyal rebut després de l'equalització, en el cas SISO, i en la figura 28 pel SIMO.

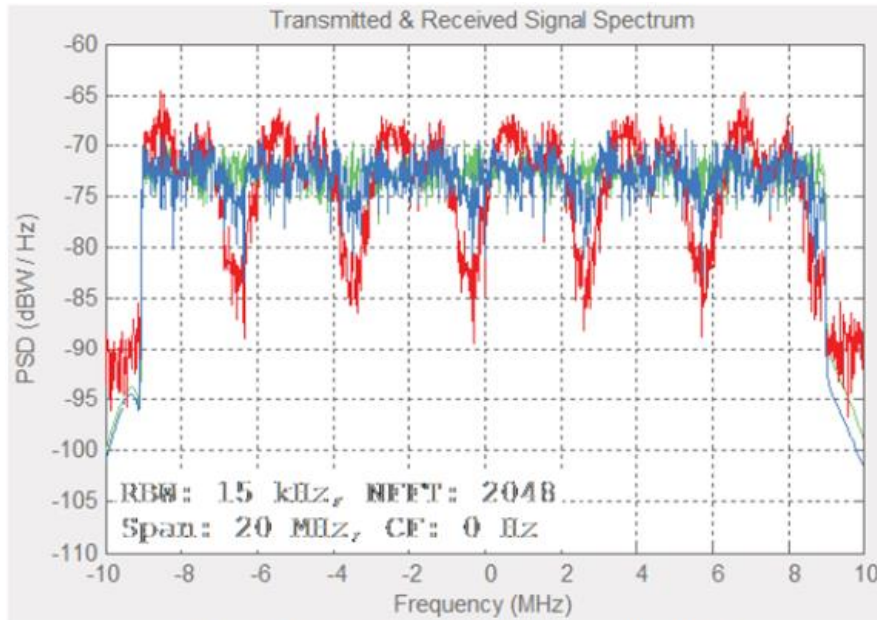


Figura 27 Densitat espectral de potència pel cas SISO

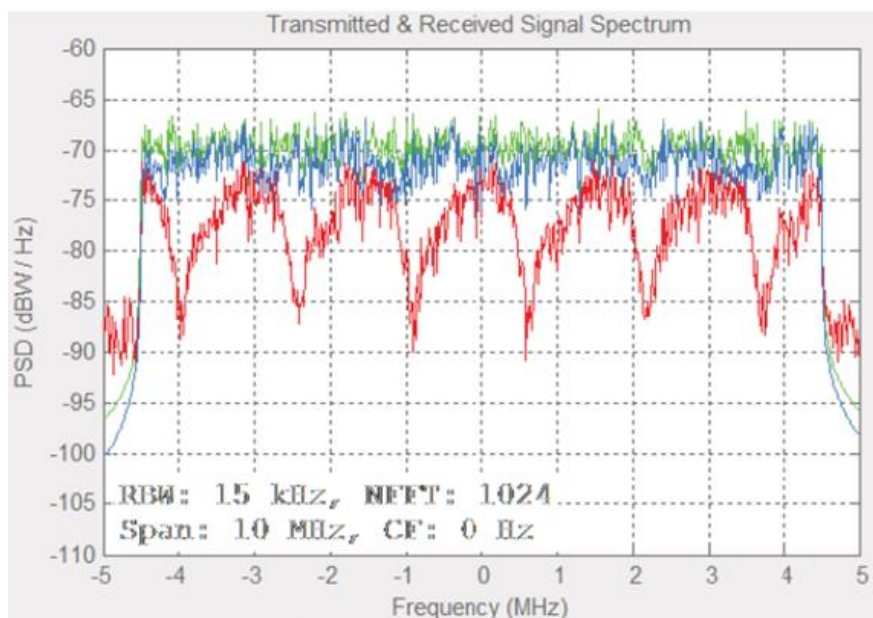


Figura 28 Densitat espectral de potència pel cas SIMO

Tant pel cas SISO i pel cas SIMO, els resultats mostren que mentre que el senyal transmès té un espectre amb la resposta de magnitud normalitzats a 1, el senyal rebut té un espectre de magnitud que reflecteix els efectes d'esvaïments multicamí del canal. Després de l'equalització, els efectes d'esvaïments són majoritàriament mitigats i la magnitud de l'espectre mostra una naturalesa en freqüència més plana, que s'assembla molt a l'espectre transmès.

La figura 29 mostra el rendiment de la BER del transceptor SISO i la figura 30 la del SIMO, com una funció del valor de SNR. Es processa 50 milions de bits en cada una de les 8 iteracions caracteritzats per un únic valor de SNR.

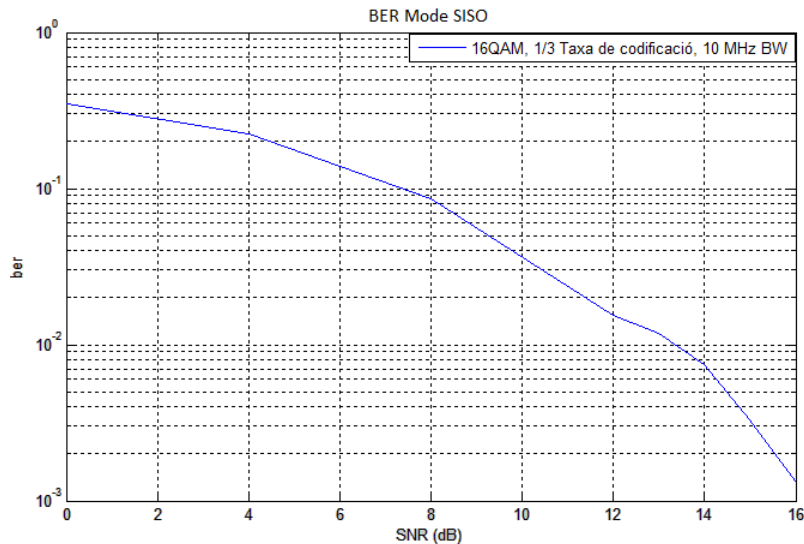


Figura 29 BER Mode 1 SISO

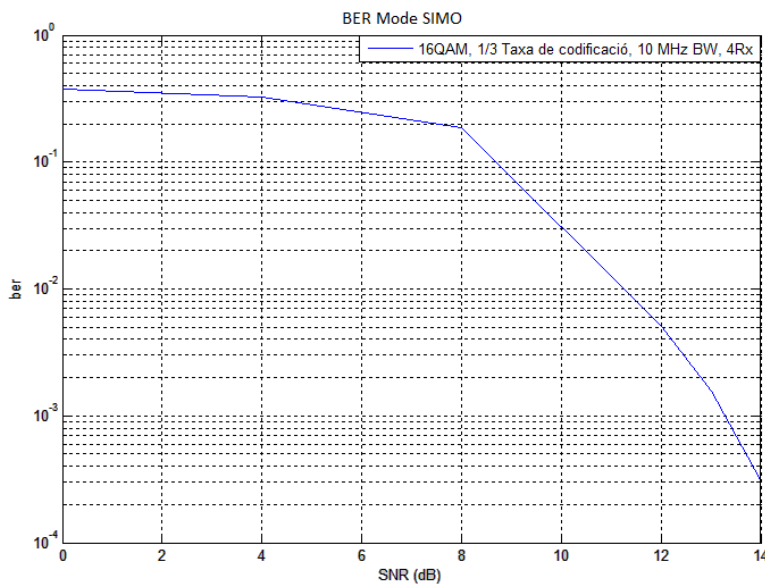


Figura 30 BER Mode 1 SIMO

En els dos casos el transceptor utilitza un esquema de modulació 16QAM, amb una taxa de codificació de 1/3, un ample de banda de sistema de 10 MHz, i una configuració d'antena SISO (1×1) i SIMO (1×4) respectivament. La selecció d'aquest conjunt de paràmetres condueix a una velocitat de dades màxima de 9.91Mbps.

- En els dos casos de configuració d'antena tant pel cas SISO com pel cas SIMO en el mode 1 de transmissió, els resultats mostren que el transceptor combat eficaçment

els efectes de la interferència entre símbols causades per esvaïments multicamí. Pel que fa al cas SIMO, al tenir diversitat de recepció amb MRC, els resultats en un sistema són millor en rendiment de la BER que en el cas SISO.

4.3.2 Exemple: Mode 2 de transmissió, Diversitat en transmissió

El següent exemple mostra un model de transceptor per al mode 2 de diversitat de transmissió de la norma LTE. Inclou les configuracions d'antenes (2 x 2) i (4 x 4). En essència són codis de velocitat completa i tots dos ofereixen més beneficis de rendiment, per la seva diversitat en comparació amb una sola antena de transmissió.

La figura 31 mostra els diagrames de constel·lació abans (primera fila) i després (segona fila) de l'equalització de dades d'usuari obtingudes a partir de cada un de les dues antenes de recepció en una subtrama. Això demostra que l'equalitzador pot compensar l'efecte d'un canal d'esvaïments per donar lloc a una constel·lació que s'assembla més a la del modulador 16 QAM.

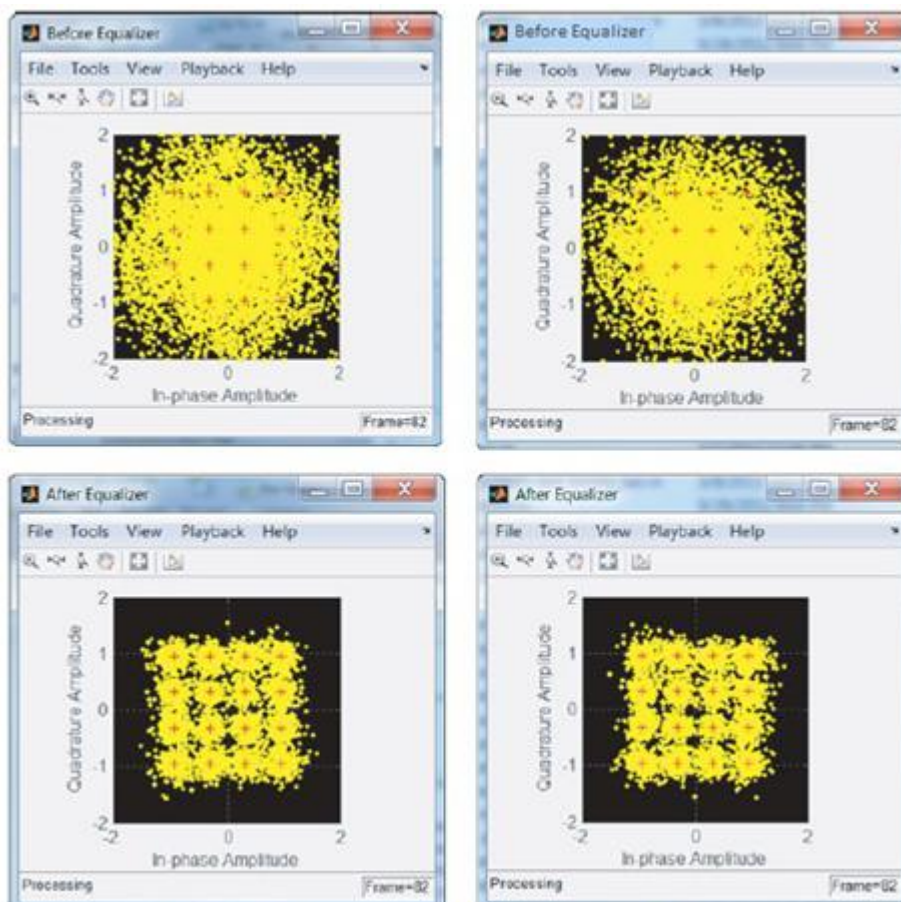


Figura 31 Diagrama de constel·lació Mode 2

En la figura 32 s'il·lustra els espectres de dades d'usuari obtingudes a partir de cada un de les dues antenes de recepció en una subtrama. Es mostra el senyal transmès (verd) i el senyal rebut abans (rosa) i després de l'equalització (blau). El senyal rebut abans de l'equalització (que mostra els efectes d'esvaïments selectiu en freqüència) s'igualava amb eficàcia per la diversitat de transmissió (mostrant una naturalesa de freqüència més plana), que s'assembla molt a l'espectre del senyal transmès.

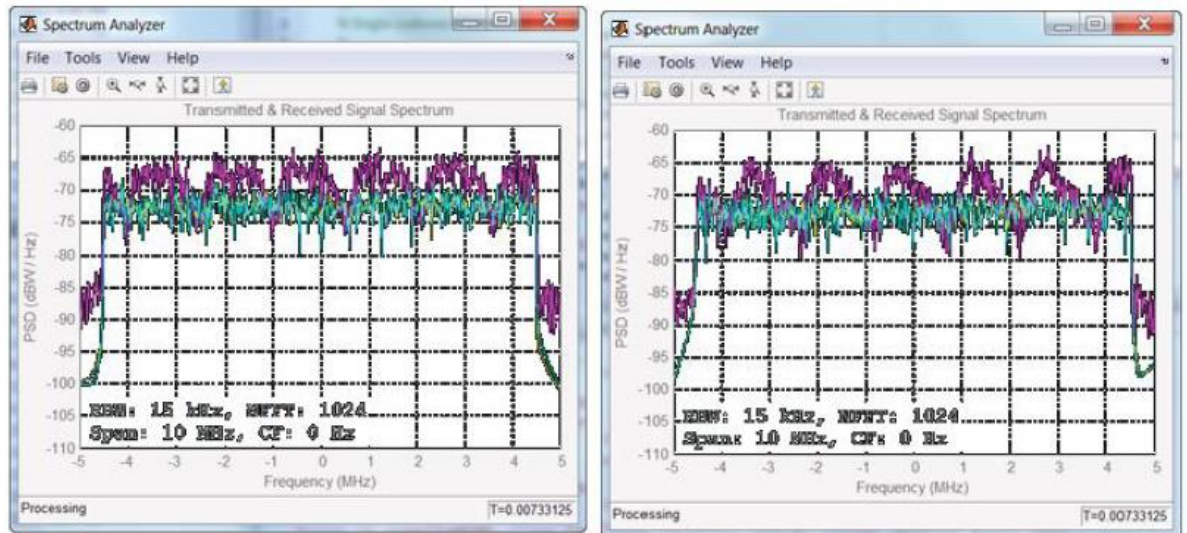


Figura 32 Densitat espectral de potència en el Mode 2

En quan al rendiment de la BER, en la figura 33 es mostra la BER del transceptor com una funció de la SNR després del processament de 50 milions de bits de dades d'usuari en cada una de les 8 iteracions.

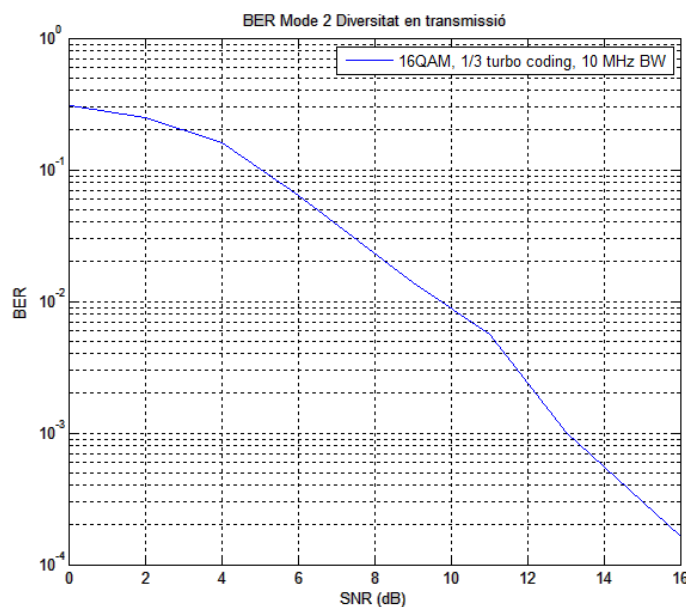


Figura 33 BER Mode 2 Diversitat en transmissió

4.3.3 Exemple: Mode 4 de transmissió, Multiplexació espacial en llaç tancat

Aquest mode emprà la multiplexació espacial amb precodificació i retroalimentació de canal en llaç tancat. En escenaris de baixa mobilitat, amb una retroalimentació de canal en llaç tancat pot conduir a unes millores en el rendiment. En aquest mode només utilitzem una paraula de codi que es genera en el DLSCH i processada pel PDSCH.

En la figura 34 es mostra els diagrames de constel·lació abans (primera fila) i després (segona fila) de l'equalització de les dades d'usuari obtingudes a partir de cada una de les dues antenes de recepció en una subtrama. Això demostra que l'equalitzador pot compensar l'efecte dels esvaïments d'un canal per donar lloc a una constel·lació que s'assembla més a la del modulador 16QAM.

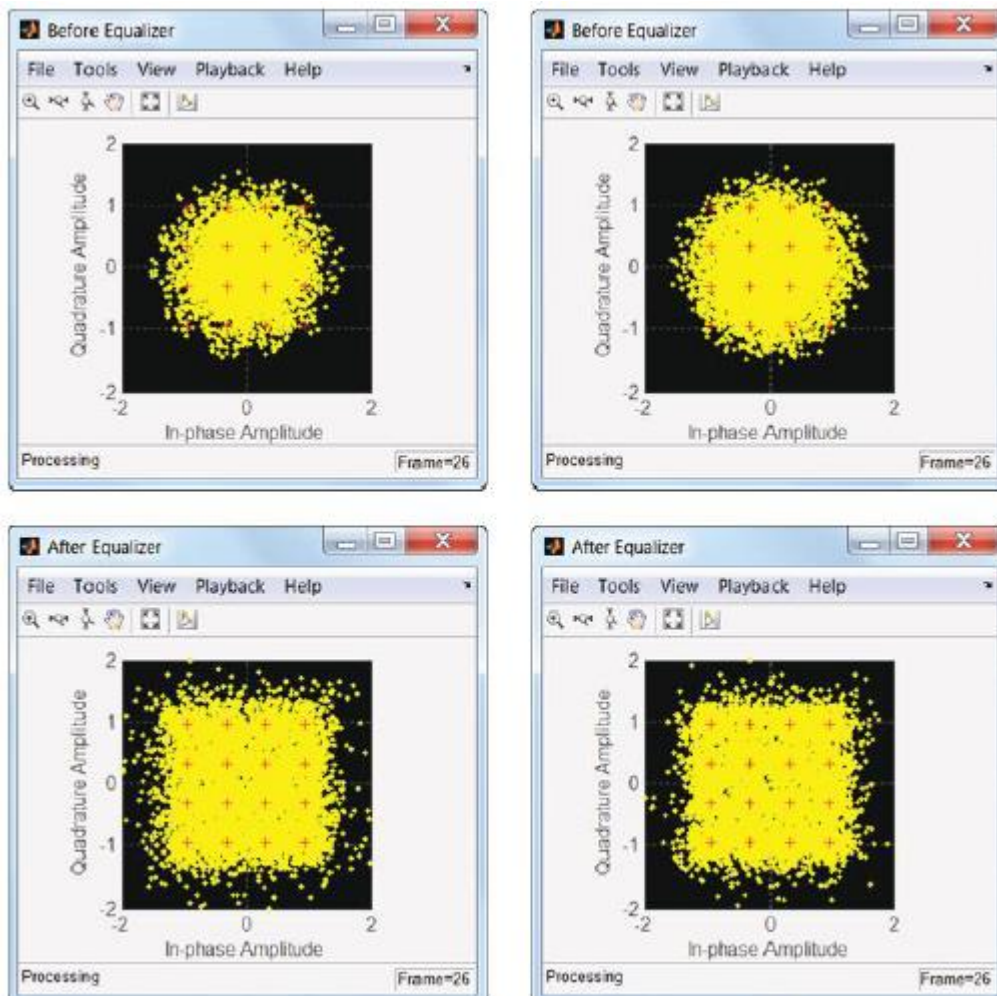


Figura 34 Diagrames de constel·lació Mode 4

En la figura 35 s'il·lustra els espectres de les dades d'usuari obtingudes a partir de cada una de les dues antenes de recepció en una subtrama. Es mostra el senyal transmès

(groc) i el senyal rebut abans (rosa) i després de l'equalització (blau). El senyal rebut abans de l'equalització (que mostra els efectes d'esvaïments selectiu en freqüència) s'igualava efectivament per la multiplexació espacial en llaç tancat (mostrant una naturalesa de freqüència més plana), que s'assembla molt a l'espectre del senyal transmès.

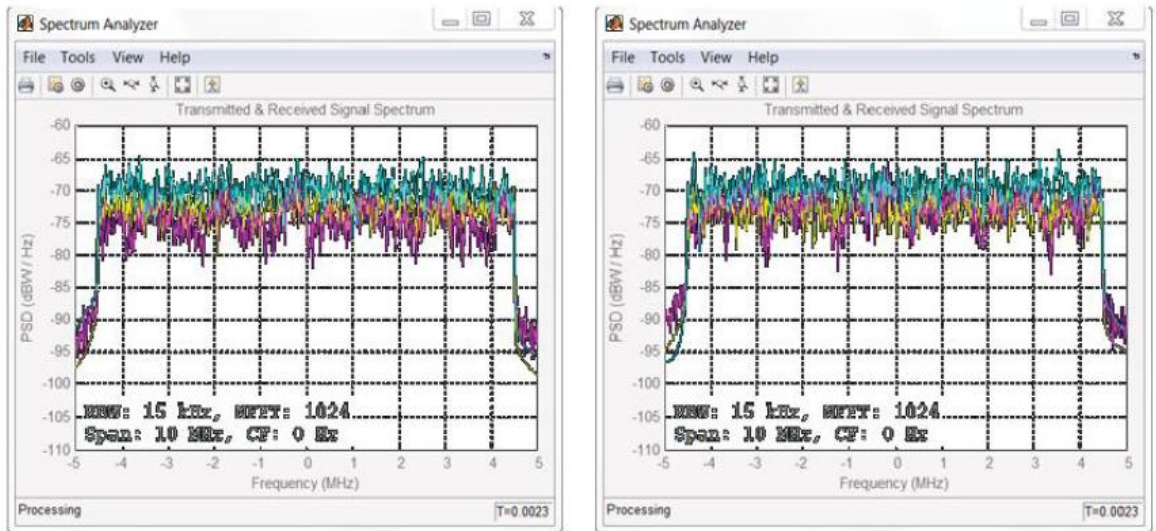


Figura 35 Densitat espectral de potència Mode 4

La figura 36 mostra la BER del transceptor com una funció dels valors de SNR després del processament de 50 milions de bits de dades d'usuari en cada una de les 8 iteracions.

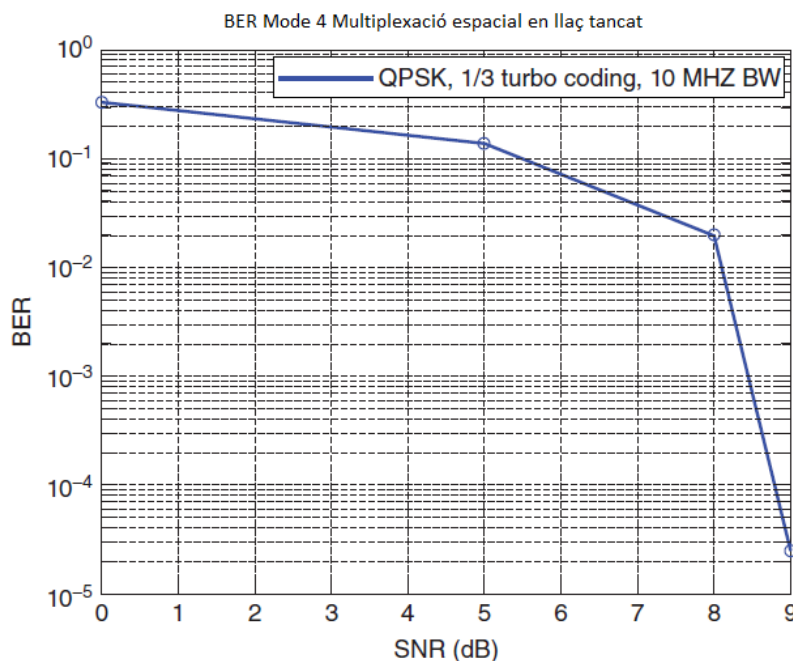


Figura 36 BER Mode 4 Multiplexació espacial en llaç tancat

4.3.4 Exemple: Mode 3 de transmissió, Multiplexació espacial en llaç obert

El tercer mode de transmissió en l'enllaç descendent utilitza multiplexació espacial en llaç obert i està destinat a la transmissió en escenaris d'alta mobilitat. En el següent exemple de MATLAB es mostra un transmissor, un receptor, i un model de canal per a aquest mode amb una sola paraula de codi de multiplexació espacial. S'utilitza les configuracions (2 x 2) i (4 x 4) d'antenes MIMO tant en el transmissor com en el receptor.

En la figura 37 es mostra els diagrames de constel·lació abans (primera fila) i després (segona fila) de l'equalització de les dades d'usuari obtingudes a partir de cada una de les dues antenes de recepció en una subtrama. Això demostra que l'equalitzador pot compensar l'efecte d'un canal d'esvaïments per donar lloc a una constel·lació que s'assembla més a la del modulador 16 QAM.

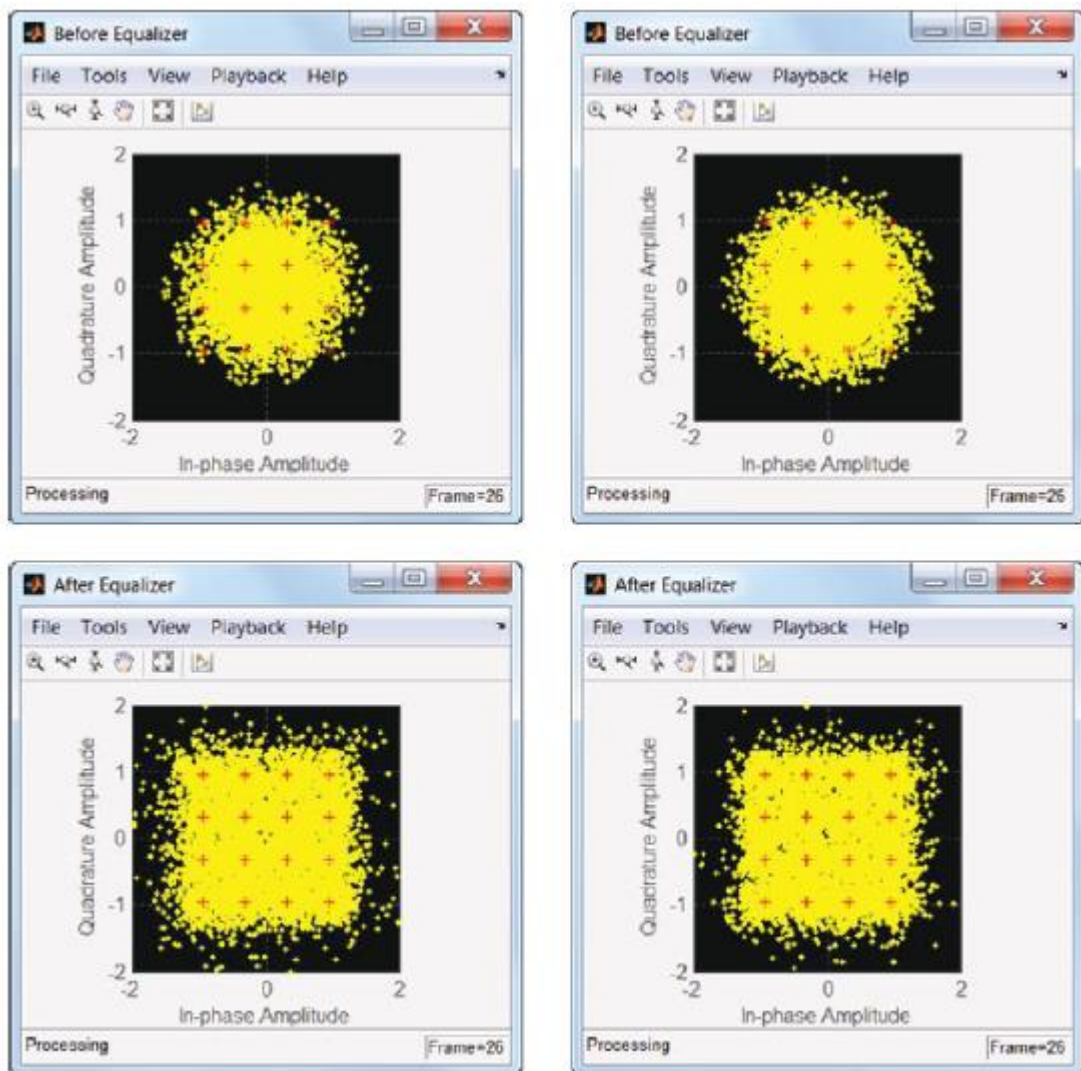


Figura 37 Diagrames de constel·lació Mode 3

En la figura 38 s'il·lustra els espectres de les dades d'usuari obtingudes a partir de cada una de les dues antenes de recepció en una subtrama. Es mostra el senyal transmès i el senyal rebut abans i després de l'equalització. El senyal rebut abans de l'equalització (que mostra els efectes d'esvaïments selectiu en freqüència) s'igualava amb eficàcia pel multiplexat espacial en llaç obert que s'utilitza en el mode 3 de transmissió (mostrant una naturalesa de freqüència més plana), que s'assembla estretament a l'espectre del senyal transmès.

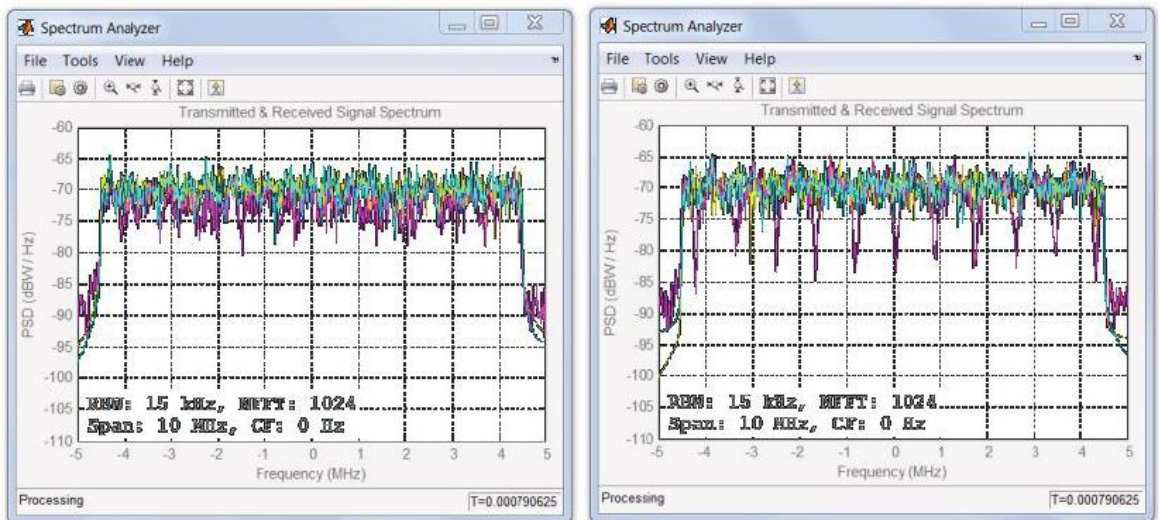


Figura 38 Densitat espectral de potència Mode 3

La figura 39 mostra la BER del transceptor com una funció dels valors de SNR després del processament de 50 milions de bits de dades d'usuari en cada una de les 8 iteracions.

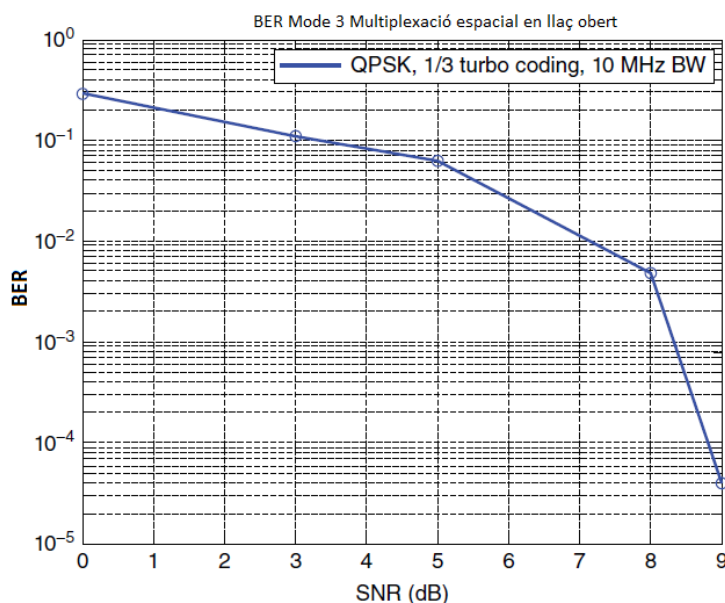


Figura 39 BER Mode 3 Multiplexació espacial en llaç obert

- Aquests modes de transmissió (2, 3 i 4) exploten dos algorismes: la diversitat de transmissió (com la SFBC) i la multiplexació espacial, amb o sense codificació de retard de la diversitat. Les tècniques de diversitat en transmissió, milloren la qualitat i la fiabilitat de l'enllaç, però no augmenten la velocitat de dades o l'eficiència espectral d'un sistema. Les tècniques de multiplexació espacial fan possible un augment substancial en les taxes de dades.
- A través de les simulacions que hem realitzat, els resultats mostren que el transceptor combat eficaçment els efectes de la interferència entre símbols causada per esvaïment multicamí, i en funció del mode, mostren que pot aconseguir altes velocitats de dades.

4.4 Exemples: Adaptació d'enllaç

Com a últims exemples amb MATLAB, veiem que per tal d'aconseguir les eficiències espectrals desitjades, les normes 3G i 4G, incloent l'LTE, utilitzen tècniques que canvien dinàmicament els paràmetres del sistema en base a les condicions del canal. Aquestes tècniques es coneixen generalment com adaptacions d'enllaç. La idea bàsica és l'adaptació de certs paràmetres de transmissió en diferents condicions del canal, ja que són monitoritzats i mesurats pel sistema. Paràmetres típics del sistema que s'adapten dinàmicament s'inclouen com l'ample de banda del sistema, els modes de transmissió MIMO, el nombre de capes de transmissió, la matriu de precodificació, la modulació i els esquemes de codificació (MCSs), i la potència de transmissió. Amb la selecció adequada d'aquests paràmetres del sistema, podem explotar els recursos d'ample de banda més eficaçment en lloc d'utilitzar un conjunt de paràmetres fix que proporciona el millor rendiment només en una condició de canal en el pitjor cas.

Hi ha tot un grup d'experiments que cobreixen els resultats d'adaptació d'enllaç que es presenten en el manual. Tots aquests experiments s'apliquen al mode 4 de transmissió MIMO. Per analitzar aquest exemples els hem dividit en dues categories:

- a) Modulació adaptativa i taxa de codificació juntament associats a les línies de base sense adaptació.
- b) Precodificació adaptativa i MIMO adaptatiu juntament associats a les línies de base sense adaptació.

En la taula 2 i 3, es mostra un resum dels codis de cada exemple MATLAB, per a cada tipus d'adaptació.

Els codis per la categoria a) són:

Funció	Escenari	Exemple
commlteMIMO.m	Sense adaptació	4.4.1 Modulació adaptativa 4.4.2 Modulació adaptativa i taxa de codificació
commlteMIMO_am.m	Modulació adaptativa basada en CQI	4.4.1 Modulació adaptativa
commlteMIMO_amRand.m	Selecció aleatòria del mode de modulació	4.4.1 Modulació adaptativa
commlteMIMO_amc.m	Modulació adaptativa i taxa de codificació basada en CQI	4.4.2 Modulació adaptativa i taxa de codificació
commlteMIMO_amcRand.m	Selecció aleatòria del mode de modulació i de la taxa de codificació.	4.4.2 Modulació adaptativa i taxa de codificació

Taula 2 Resum dels codis MATLAB sobre l'adaptació d'enllaç en la categoria a

Els codis per la categoria b) són:

Funció	Escenari	Exemple
commlteMIMO_d.m	Sense adaptació	4.4.3 Precodificació adaptativa 4.4.4 MIMO adaptatiu
commlteMIMO_d_PMI.m	Índex precodificació adaptativa basat en PMI	4.4.3 Precodificació adaptativa
commlteMIMO_d_PMI_RI.m	Precodificació adaptativa basada en PMI i MIMO adaptatiu basat en RI	4.4.4 MIMO adaptatiu

Taula 3 Resum dels codis MATLAB sobre l'adaptació d'enllaç en la categoria b

Aquests codis un cop s'executen de un en un, veiem com per a successives subtrames certs paràmetres canvien, segons el tipus d'adaptació d'enllaç.

4.4.1 Exemples: Modulació adaptativa

En aquest tipus d'adaptació aprofita l'informe d'estat del canal CQI per canviar l'esquema de modulació del transceptor en successives subtrames. S'implementa una selecció de modulació de banda ampla, en què en una subtrama donada tots els blocs de recursos tindran el mateix esquema de modulació i el canvi es produeix entre subtrames.

Es compara la modulació adaptativa amb implementacions alternatives. Comptem amb tres algoritmes que s'apliquen en diferents escenaris d'adaptació:

- Línia de base (sense adaptació)
- Adaptació a través de canvi aleatori del tipus de modulació
- Adaptació per l'explotació dels mesuraments de canal CQI

Com es mostra en la figura 40, s'il·lustra els canvis en l'esquema de modulació que afecten la velocitat de dades instantània i per tant la velocitat de dades mitjana.

```

Modulation                = 64QAM
Instantaneous Data rate   = 30.58 Mbps
Average Data rate         = 30.58 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 6.00
Average Modulation rate   = 6.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate       = 0.3333

Modulation                = QPSK
Instantaneous Data rate   = 10.30 Mbps
Average Data rate         = 20.44 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 2.00
Average Modulation rate   = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate       = 0.3333

Modulation                = 16QAM
Instantaneous Data rate   = 19.85 Mbps
Average Data rate         = 20.24 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate   = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate       = 0.3333

```

Figura 40 Paràmetres modulació adaptativa

Per a cada un dels escenaris d'adaptació, calculem les BERs pel processament de 20 milions de bits. Observant la taula 4, veiem que com era d'esperar, la modulació adaptativa respon a una qualitat de canal que funciona millor. En escenaris sense adaptacions, com fem servir més velocitats altes de modulació, com ara 64 QAM, obtenim altes velocitats de dades a costa de BERs més altes. Quan utilitzem velocitats de modulació inferiors, com ara QPSK, obtenim BERs més baixes, però les velocitats de dades són més baixes. No obstant això, com seleccionem un esquema de modulació basada en la qualitat del canal, s'obté el millor compromís en condicions d'ambdues qualitats altes i baixes dels canals.

Type of modulation	Average data rate (Mbps)	Modulation rate	Coding rate	Bit error rate
QPSK – no adaptation	20.61	2	0.3333	1.2e ⁻⁰⁶
16QAM – no adaptation	39.23	4	0.3333	1.4e ⁻⁰⁶
64QAM – no adaptation	61.66	6	0.3333	0.0033
Random selection	40.75	2 or 4 or 6	0.3333	0.0014
Adaptive modulation	52.61	2 or 4 or 6	0.3333	0.0009

Taula 4 Modulació Adaptativa

-En subtrames amb major qualitat de canal, triem majors taxes de modulació. Encara que estem utilitzant esquemes de modulació amb les distàncies mínimes de constel·lació més petites, com que el canal es considera net, la probabilitat d'error en aquestes subtrames és baixa, de manera que gaudeix de la taxa més alta sense massa cost dels errors de bits.

-En subtrames amb menor qualitat de canal, tenim menors taxes de la modulació. Aquestes taxes s'associen amb majors distàncies entre punts de la constel·lació i com a resultat la probabilitat d'error és baixa. Aquestes subtrames com a resultat produeixen una reducció en les taxes globals, però mantenen la qualitat dins d'un rang acceptable.

Com a resultat, la BER mitjana amb modulació adaptativa (0.0009) és menor que la selecció a l'atzar (0.0014) i la velocitat mitjana de dades amb modulació adaptativa (52.61 Mbps) és més gran que aquella amb la selecció aleatòria (40.75 Mbps). Observem que amb l'adaptació basada en la qualitat del canal s'obté la millor solució de compromís pel que fa a la taxa més alta i la taxa d'error raonable.

4.4.2 Exemples: Modulació adaptativa i taxa de codificació

En aquest exemple fem servir l'informe d'estat de canal CQI per canviar adaptativament tant l'esquema de modulació i la taxa de codificació del transceptor en subtrames successives. Es compara la qualitat del canal (CQI-based) adaptativa basat en dos algoritmes que s'apliquen en diferents escenaris d'adaptació:

- Línia de base (sense adaptació)
- Adaptació a través de canvi aleatori del tipus de modulació i taxa de codificació.

En la figura 41 podem veure els canvis tant en l'esquema de modulació i en la taxa de codificació que afecta a la taxa de dades instantània i per tant la taxa de dades mitjana del transceptor.

```

Modulation = 64QAM
Instantaneous Data rate = 61.66 Mbps
Average Data rate = 61.66 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 6.00
Average Modulation rate = 6.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate = 0.3333

Modulation = 16QAM
Instantaneous Data rate = 39.23 Mbps
Average Data rate = 50.45 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate = 5.00
Instantaneous Coding rate = 0.3685
Average Coding rate = 0.3509

Modulation = QPSK
Instantaneous Data rate = 31.70 Mbps
Average Data rate = 44.20 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 2.00
Average Modulation rate = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.6225
Average Coding rate = 0.4415

```

Figura 41 Paràmetres de modulació adaptativa i taxa de codificació

Per a cada un dels tres escenaris d'adaptació, calculem la BER mitjançant el processament de 20 milions de bits. Durant els primers quatre experiments (no adaptacions en el cas de QPSK, 16QAM, i 64QAM i una selecció aleatòria de modulació en cada subtrama), es tria una taxa de codificació constant de 0.4932. Aquesta taxa de codificació és la mitjana de les taxes en el cas d'adaptació i és tria per tal de fer comparacions justes.

Type of modulation	Average data rate (Mbps)	Modulation	Coding rate	Bit error rate
QPSK – no adaptation	28.34	2	0.4932	$2.8e^{-06}$
16QAM – no adaptation	57.34	4	0.4932	$7.9e^{-04}$
64QAM – no adaptation	87.01	6	0.4932	$3.6e^{-02}$
Random selection	56.81	2 or 4 or 6	0.5037	$2.5e^{-02}$
Adaptive modulation and coding	64.73	2 or 4 or 6	0.333–0.94	$4.7e^{-03}$

Taula 5 Modulació adaptativa i taxa de codificació

Com observem en la taula 5, els resultats en aquest cas són molt similars a aquells en el cas en què només s'utilitza la modulació adaptativa. Amb la modulació fixa i taxes de codificació, s'obtenen taxes més altes i modulacions d'ordre superior a costa d'una BER molt menor assolible. Canviant la modulació sobre la selecció aleatòria proporciona els resultats mitjans dels tres casos de modulació fixos. Modulació adaptativa i taxa de codificació basat en la qualitat del canal proporciona el millor compromís.

La velocitat de dades mitjana en l'enfocament adaptatiu basat en CQI (64.73 Mbps) és més gran que en el cas de la selecció a l'atzar (56.81 Mbps). La BER de codificació adaptativa (0.0047) és menor que en el cas de la selecció a l'atzar (0.0250).

4.4.3 Exemples: Precodificació adaptativa

En aquesta adaptació, utilitzem l'informe d'estat de canal PMI per canviar l'índex de la matriu de precodificació en subtrames successives. Aquesta adaptació només està disponible en el mode de transmissió en llaç tancat de multiplexació espacial (Mode 4). A la Figura 42 es mostra els diferents índexs de llibre de codi PMI (1 o 2).

```

PMI codebook index = 1
Modulation           = 16QAM
Instantaneous Data rate = 19.85 Mbps
Average Data rate    = 19.85 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate   = 0.3333

PMI codebook index = 2
Modulation           = 16QAM
Instantaneous Data rate = 19.85 Mbps
Average Data rate    = 19.85 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate   = 0.3333
  
```

Figura 42 Paràmetres de precodificació adaptativa

En la taula 6, veiem com aquestes variacions de l'índex PMI no afecten l'esquema de modulació, la taxa de codificació, la velocitat de dades instantània, o la taxa de dades mitjana del transceptor. Com s'esperava l'efecte relatiu a la BER reflecteix els beneficis de la precodificació adaptativa.

Type of modulation	Average data rate (Mbps)	Modulation rate	Coding rate	Bit error rate
No modulation and coding adaptation	35.16	4	1/3	0.1278
No modulation and coding adaptation + adaptive PMI	35.16	4	1/3	0.01191

Taula 6 Precodificació adaptativa

4.4.4 Exemples: MIMO adaptatiu

En aquesta adaptació utilitzem l'informe d'estat de canal del RI per alternar de forma adaptativa la manera de transmissió entre la diversitat de transmissió i la multiplexació espacial. Si el rang estimat és igual al nombre d'antenes de transmissió, portem a terme la multiplexació espacial. Per simplicitat, si el rang és menor que el nombre d'antenes de transmissió llavors tornem a transmetre diversitat. S'utilitza el mateix nombre d'antenes però es renuncia a la major taxa de dades associada amb la multiplexació espacial en favor de la major fiabilitat de l'enllaç associat amb la diversitat de transmissió.

A la Figura 43 veiem com els canvis de mode de transmissió sobre la base de l'estimació del RI afecten la velocitat de dades instantània i per tant la velocitat de dades mitjana del transceptor.

```
PMI codebook index = 1
Transmission mode = 4
Modulation           = 16QAM
Instantaneous Data rate = 19.85 Mbps
Average Data rate     = 19.14 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate   = 0.3333

PMI codebook index = 1
Transmission mode = 2
Modulation           = 16QAM
Instantaneous Data rate = 9.91 Mbps
Average Data rate     = 19.03 Mbps
Instantaneous Modulation rate = 4.00
Average Modulation rate = 4.00
Instantaneous Coding rate = 0.3333
Average Coding rate   = 0.3333
```

Figura 43 Paràmetres de MIMO adaptatiu

Els resultats indiquen que, com s'esperava, s'obté majors velocitats de dades quan s'utilitza la multiplexació espacial que quan s'utilitza la diversitat de transmissió com es pot veure en la taula 7. En utilitzar el mètode d'estimació de rang, s'obté una taxa mitjana que està més a prop a l'obtinguda amb multiplexació espacial.

Type of modulation	Average data rate (Mbps)	Modulation rate	Coding rate	Bit error rate
Fixed mode: transmit diversity	15.26	4	2/3	$3.4e^{-07}$
Fixed mode: spatial multiplexing	19.85	4	1/3	$1.3e^{-03}$
Adaptive mode based on RI feedback	19.23	4	1/3	$7.1e^{-04}$

Taula 7 MIMO adaptatiu

5 Part econòmica

Com aquest projecte és bastant teòric, que s'ha estudiat amb la ajuda del llibre que se segueix per dur a terme el projecte i mitjançant el programa MATLAB on s'analitzen les característiques més rellevants del sistema LTE per a que es pugui ensenyar d'una manera didàctica amb el manual annex a aquest projecte (on s'inclouen tots els codis de MATLAB amb les seves explicacions) peculiaritats de l'estàndard. Per tant, s'ha decidit que la part econòmica d'aquest projecte no aplica.

6 Conclusions i línies futures

Com s'ha pogut observar mitjançant l'anàlisi del comportament de les diferents tècniques definides per les capes baixes del sistema LTE, tenen uns avantatges significatius sobre tecnologies alternatives d'accés múltiple, com alta eficiència espectral i adaptabilitat per la transmissió de dades de banda ampla, i resistència a la interferència entre símbols causada pels esvaïments multicamí.

Amb els exemples que s'han analitzat, hem vist com les pèrdues per efecte multicamí, les quals fan que diverses còpies del mateix senyal passin per diferents rutes i arribin al receptor de manera desfasada, tot i això afectant al rendiment del sistema. Generen pèrdues en el senyal propagat, lo que produeix disminució de la potència (distorció). Amb els sistemes de múltiples antenes, hem vist com podíem minimitzar aquestes pèrdues i aprofitar aquests efectes per millorar el rendiment del sistema.

En el mode 1 de transmissió en enllaç descendent, veiem com el transceptor combat eficaçment els efectes de la interferència entre símbols causades pels esvaïments multicamí. En el cas SIMO al tenir diversitat en recepció amb MRC, els resultats són millor en rendiment de la BER que pel cas SISO. En els altres modes, en el 2, 3 i 4, on s'utilitzen els algorismes de diversitat de transmissió i la multiplexació espacial. Hem observat com les tècniques de diversitat en transmissió, milloren la qualitat i la fiabilitat de l'enllaç, però no augmenten la velocitat de dades o eficiència espectral d'un sistema. En canvi, les tècniques de multiplexació espacial si fan possible un augment substancial en les taxes de dades.

Per tal d'aconseguir les eficiències espectrals desitjades, LTE utilitza unes tècniques que canvien dinàmicament els paràmetres de transmissió en diferents condicions del canal. Mitjançant la modificació de paràmetres com l'ample de banda, els modes de transmissió MIMO, el nombre de capes de transmissió, la matriu de precodificació i la modulació hem obtingut la millor solució de compromís pel que fa a la taxa de dades més alta i la taxa d'error raonable.

Com a millores o línies futures en aquest projecte, encara hi ha moltes peculiaritats del sistema LTE per analitzar, ja que en aquest projecte no es podia abastar tot el sistema LTE, només s'ha explicat unes quantes característiques rellevants. Un altre fet que es podria fer, seria profunditzar més en algun tema concret del sistema LTE i modificar paràmetres dels codis MATLAB, per veure com canvia les simulacions i treure algunes conclusions.

7 Bibliografia

- [1] H.Zarrinkoub. "*Understanding LTE with MATLAB*", ISBN 978-1-118-44341-5, Wiley, 2014
- [2] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, O. Sallent. "*LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*". Barcelona: Fundación Vodafone España, 2010.
- [3] M. Gorricho, J.L. Gorricho. "*Comunicaciones móviles*". Barcelona: Edicions UPC, 2012.
- [4] A. Ghosh, J. Zhang, J. Andrews, R. Muhamed. "*Fundamentals of LTE*". Boston: Prentice Hall, 2011.
- [5] J. Ortin, "Estudio de técnicas de codificación de canal en redes celulares OFDM", Zaragoza, 2012
- [6] MathWorks, "Transmit-Receive Chain", LTE Toolbox Example, 2014

Glossari

AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCH	Broadcast Channel
BER	Bit Error Rate
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CSR	Cell-Specific Reference
DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
EDGE	Enhanced Data Rates
eNodeB	enhanced Node Base station
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FSTD	Frequency Switched Transmit Diversity
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSPA	High-Speed Packet Access
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding Schemes
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
MRC	Maximum Ratio Combining
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMI	Precoder Matrix Indicator
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RI	Rank Indicator
SC	Selection Combining
SC-FDM	Single-Carrier Frequency Division Multiplexing
SFBC	Space–Frequency Block Coding
SISO	Single Input Single Output



SIMO	Single Input Multiple Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSS	Secondary Synchronization Signal
STBC	Space–Time Block Coding
SFBC	Space-Frequency Block Coding
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
ZF	Zero Forcing