



TALLER

Comunicación MIMO Multi-usuario con Software Defined Radio (SDR)

Guía del Estudiante

**TELECO
RENTA**

PLAN DE
PROMOCIÓN DE LOS ESTUDIOS
DE TELECOMUNICACIÓN



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Disclaimer

Este taller ha sido preparado por el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), en el contexto del Plan de promoción de los estudios de Telecomunicación (programa UNICO 5G I+D).

El contenido de este taller, incluyendo el código fuente, guía del instructor y guía del estudiante se pone a disposición de uso de cualquier persona o entidad. No se permite sin embargo reutilizar o modificar su contenido sin el consentimiento explícito del CTTC.

Contacto: telecorenta@cttc.cat

Taller preparado por Adrián Agustín, Mónica Navarro.

Historia del documento

Revisión	Fecha	Secciones afectadas	Cambios
V1.0	08/07/2024	Todas	1ª edición

ÍNDICE

1.	Objetivos del taller.....	5
2.	Consideraciones preliminares	5
4.1	Configuración de los dispositivos.....	5
4.2	Código Matlab.....	7
4.3	Entendiendo el código del transmisor.....	8
4.4	Entendiendo el código del receptor	9
3.	Modelo de señal.....	10
4.1	Trama transmitida.....	10
4.2	Sincronización en tiempo (inicio de la trama).....	11
4.3	Estimación de canal	11
4.4	OFDM	12
4.5	Precodificación MIMO OFDM	13
4.6	Precodificación MIMO en este Taller	13
4.	Ejercicios prácticos	15
4.1	Experimento 1: Utilización del precodificador Zero Forcing	15
4.2	Experimento 2: Utilización del precodificador Matched Filter	17
4.3	Experimento 3: Utilización de múltiples antenas en recepción	18
5.	Referencias	20

Lista de Tablas y Figuras

<i>Figura 1. Entorno de laboratorio en el CTTC.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Modelo de comunicaciones.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Descripción general de las principales funciones para realizar la transmisión</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4. Descripción general de las principales funciones para realizar la recepción de la señal en los usuarios.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5. Trama de señal transmitida.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Asignación de los recursos a los diferentes usuarios en términos de portadoras y tiempo. La transmisión utiliza recursos compartidos (portadoras 4-12) y recursos ortogonales (portadoras 49-100 para UE1 y 149-200 para el UE2). Los recursos en “naranja” son destinados para la transmisión de datos, mientras que los recursos en “verde” transmiten secuencias conocidas (midambles) por parte del receptor, que ayudarán a mejorar la estimación del canal en recepción. En los recursos en blanco no se transmite ninguna señal.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 1.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 2</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 3</i>	<i>19</i>

Acrónimos

DFT	Discrete Fourier Transform
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMCX	Micro-miniature coaxial connector
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
RF	Radio Frecuencia
SDR	Software Defined Radio
SFP+	Small Form-factor Pluggable plus
SW	Software
UHD	USRP Hardware Driver
USRP	Universal Software Radio Peripheral

1. Objetivos del taller

El objetivo principal de este taller es familiarizarse con la tecnología SDR - Software Defined Radio o radio definida por software - y su aplicación en el contexto de las comunicaciones inalámbricas en redes celulares.

El taller consta pues de dos elementos principales:

- El hardware adaptado a la tecnología SDR (o USRP)
- La herramienta de simulación Matlab (programa SW) y el código desarrollado en Matlab

En particular este taller explora la comunicación multiusuario con múltiples antenas (MIMO, Multiple Input Multiple Output). Al finalizar el taller se espera que el estudiante tenga:

- Motivación por adentrarse en la experimentación con señales transmitidas a través del aire por ondas electromagnéticas, así como haya adquirido familiarización con el procesamiento digital de dichas señales en el receptor.

Para la realización del taller se ha partido de unos ejemplos estándar disponibles en Matlab para la comunicación multiusuario. Se proporcionan una serie de ejercicios o pruebas guiadas que permitirán al estudiante experimentar en un entorno con equipos que emulan una comunicación real, trabajando en tiempo real.

El presente documento se estructura en dos secciones principales. La sección 2 (Consideraciones preliminares) donde se hace una introducción a la tecnología SDR y su configuración. Además, se introducen las funciones de Matlab que son importantes para interaccionar con las USRPs (SDRs), y se hace una explicación del código que se va a utilizar. El modelo de señal considerado se presenta la sección 3 (Modelo de Señal). La sección 4 (Ejercicios prácticos) propone una serie de ejercicios que los estudiantes deben llevar a cabo. En la siguiente tabla se detalla qué secciones son más importantes para un instructor o un estudiante.

2. Consideraciones preliminares

Esta sección introduce conceptos básicos de la tecnología SDR, así como establece la configuración necesaria previa a la realización del taller. La sección también proporciona una descripción de la infraestructura experimental necesaria para la realización del taller. Dichos equipos están a disposición para la realización del taller en las instalaciones del CTTC, previo acuerdo por razones organizativas.

La configuración puede reproducirse en otros laboratorios si se dispone del hardware necesario, así como la correspondiente licencia de Matlab.

4.1 Configuración de los dispositivos

El entorno de experimentación se ha configurado con un mínimo de 4 SDRs, pero el taller puede extenderse a dispositivos adicionales. La Figura 1 muestra la configuración preparada para la realización del taller en las instalaciones del CTTC, dentro de uno de sus laboratorios.

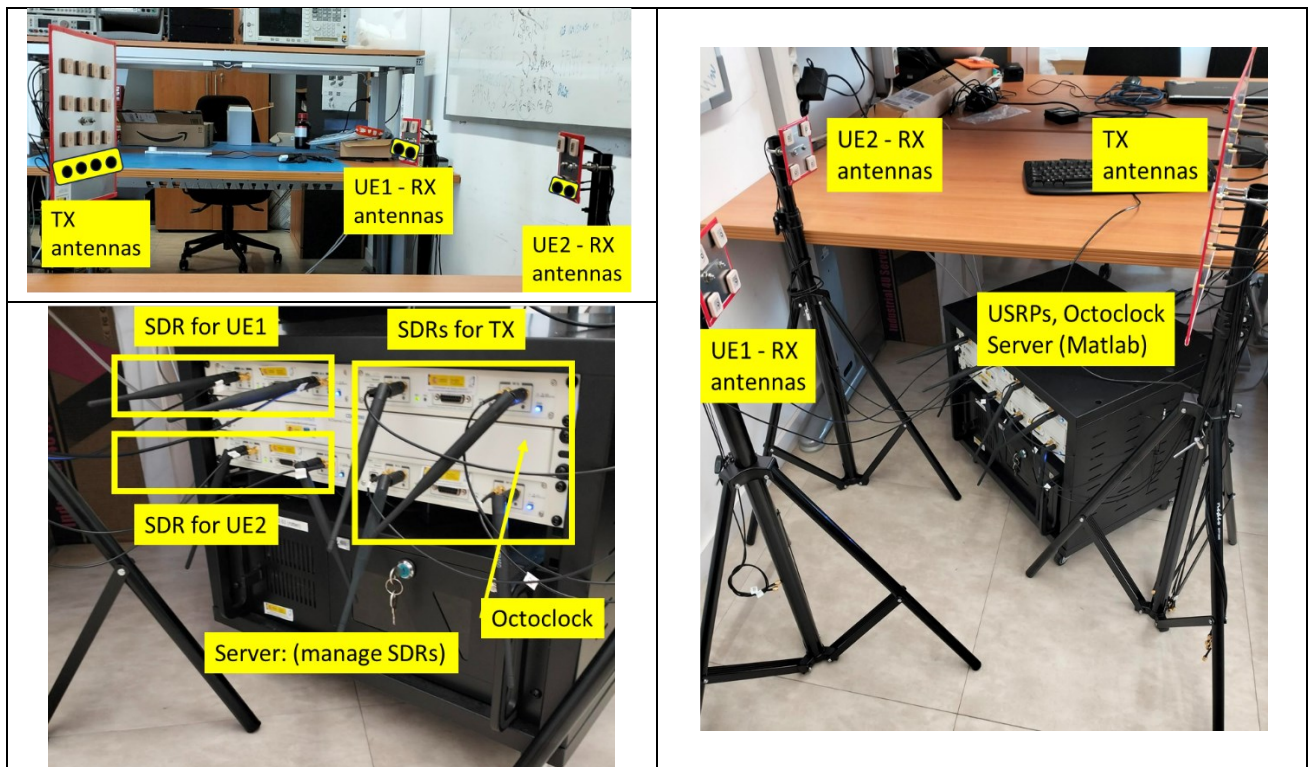


Figura 1. Entorno de laboratorio en el CTTC

La infraestructura se compone de 4 partes:

- Servidor:** Servidor Intel(R) Core (TM) i7-7800X CPU @ 3.50GHz con sistema operativo Ubuntu 22.04.2 LTS donde se ha instalado todo el software necesario: Matlab y driver UHD para comunicarse con las SDR. La conexión de datos entre servidor y SDRs es a través de conexiones SFP+, las cuales requieren del cableado y tarjeta de red correspondiente. Para la instalación se han seguido las instrucciones detalladas en [ETT-X310].
- SDR:** Como se aprecia en la figura, hay 4 SDRs (USRP X310) que tienen 2 tarjetas de RF cada una de ellas. Cada SDR está conectada directamente con el servidor y conexiones con el elemento que distribuye el sincronismo (que no se observan en la Figura 1).
- Elemento de sincronismo.** Este dispositivo es el Octoclock 2990, elemento que separa las SDRs superiores e inferiores en la Figura 1. Para la instalación se ha seguido los pasos descritos en [ETT-Octoclock]. Por la parte trasera del dispositivo se distribuye la señal de reloj de 10MHz y 1 PPS a las 4 SDRs. En el caso del laboratorio del CTTC, se utiliza una SDR como referencia para distribuir el reloj y la señal de PPS al resto de SDRs.
- Antenas:** Para cada tarjeta de RF hay una salida de transmisión (TX) y otra de recepción (RX), que se conectarán a diferentes paneles de antenas. Las antenas de cada panel tienen dimensiones 25*25*5.3mm y son antenas de parche (WPC.25B.35 2.4GHz Ceramic Patch Antenna) con un on-board MMCX(F) (Micro-miniature coaxial connector). Como se observa en la figura, los transmisores (SDR#1, SDR#2) están conectados en el panel de forma que utilizan 4 antenas, mientras que los usuarios están (#SDR3 y #SDR4) están conectados a 2 antenas de cada panel.

La configuración propuesta responde a evaluar un modelo de comunicación multiusuario como el que se ilustra en la Figura 2. Este corresponde a un sistema de comunicación multipunto a multipunto over-the-air”, a través de la interfaz radio (medio físico). Es decir la señal se trasmite y recibe “over-the-air”, pero el procesado digital se realiza en los servidores. El diseño del filtro transmisor necesita de un conocimiento del estado de canal, para ello, los diferentes terminales estimarán el canal en recepción, y lo reportarán al transmisor. Esta parte de la comunicación no es realizada “over-the-air”, a través de intercambios de ficheros.

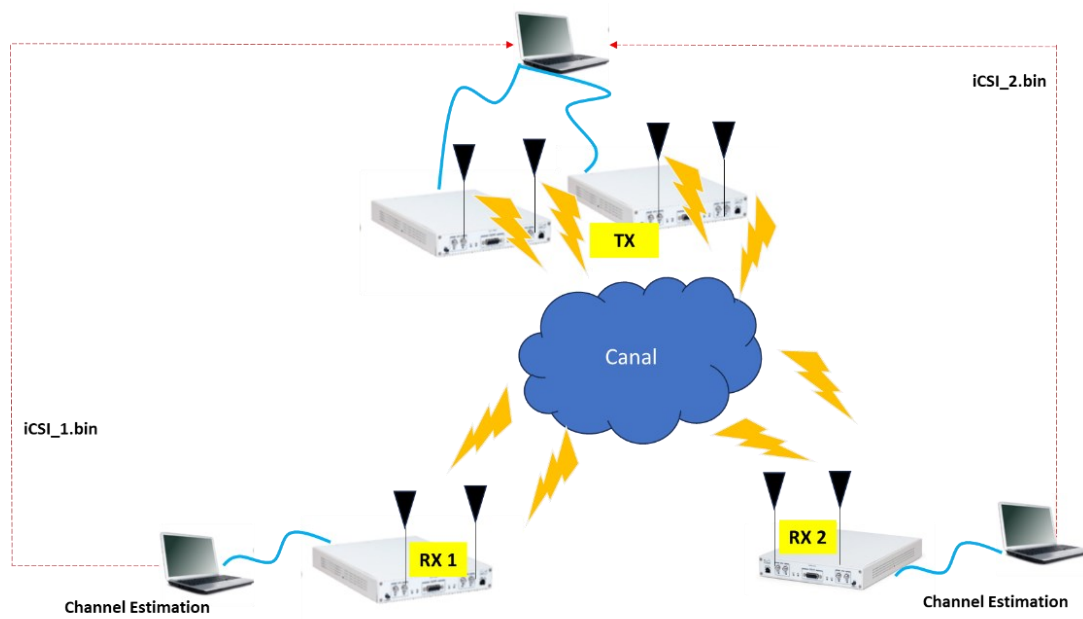


Figura 2. Modelo de comunicaciones

4.2 Código Matlab

El código se puede descargar desde: <https://cloud.cttc.es/index.php/s/pmKZRCys4FoJrSb>

El paquete de software del taller contiene los siguientes ficheros en código Matlab:

Scripts:

1. Experimento 0

- a. Ex0_script_BS.m
- b. Ex0_script_UE_1.m / Ex0_script_Offline_UE_1.m
- c. Ex0_script_UE_2.m / Ex0_script_Offline_UE_1.m

2. Experimento 1

- a. Ex1_script_BS.m
- b. Ex1_script_UE_1.m / Ex1_script_Offline_UE_1.m
- c. Ex1_script_UE_2.m / Ex1_script_Offline_UE_2.m

3. Experimento 2

- a. Ex2_script_BS.m

- b. Ex2_script_UE_1.m / Ex2_script_Offline_UE_1.m
- c. Ex2_script_UE_2.m / Ex2_script_Offline_UE_2.m

4. Experimento 3

- a. Ex3_script_BS.m
- b. Ex3_script_UE_1.m / Ex3_script_Offline_UE_1.m
- c. Ex3_script_UE_2.m / Ex3_script_Offline_UE_2.m

Funciones:

1. MU_MIMO_Tx_BS_USRP.m
2. PilotSequenceGen.m
3. MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m
4. Ex1_MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m
5. ChannelEstimationMIMO.m
6. Offline_MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m
7. Ex1_Offline_MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m

4.3 Entendiendo el código del transmisor

La ejecución de la parte de transmisión se realiza a través del script `script_BS.m`, que a su vez llama a la función `MU_MIMO_Tx_BS_USRP.m`. En la Figura 3 se realiza una breve descripción de las principales tareas de cada función. En el `script_BS.m` se configuran los principales parámetros de la comunicación como el número de antenas, número de usuarios, direcciones IP de las USRPs a utilizar para la transmisión, la frecuencia portadora y el tipo de precodificación espacial que se aplica en los recursos compartidos. Esta última puede ser de 3 tipos: 0) Siempre Matched filter (MF) o filtro adaptado, 1) Siempre Zero Forcing (ZF) o forzador de ceros, 2) Alternando un intervalo de tiempo MF y ZF.

Por su parte, la función `MU_MIMO_Tx_BS_USRP.m` tiene como misión inicializar las USRPs a los valores apropiados, y generar la señal a transmitir. Para ello, esta función irá leyendo la información de canal a través de unos ficheros que envía cada usuario y utilizará esa información para calcular el precodificador espacial.

script_BS.m

- Configuration:
- M (tx antenas)
 - K (UEs)
 - N (rx antenas)
 - IP addresses
 - Carrier Frequency
 - Type precoding

MU_MIMO_Tx_BS_USRP.m

- USRP configuration
- Generation Pilots in single-carrier
- Payload in OFDM
- Files to exchange the CSI (reading only)
- File to store all the received CSI
- Read the CSI
- Calculate the precoders
- Generate the data to be transmitted
- Send the data to the USRP

Figura 3. Descripción general de las principales funciones para realizar la transmisión

4.4 Entendiendo el código del receptor

Cada usuario debe ejecutar su script correspondiente, `script_UE_1.m` o `script_UE_2.m`, que se encarga de detallar la configuración de cada dispositivo. Hay que destacar que la USRP asociada a uno de los usuarios (usuario #1) es la encargada de proporcionar la señal de reloj para sincronizar a las restantes USRPs. Esta función se configura con la variable `isClockReference=1`.

Una vez se configuran los principales parámetros, cada script llama a la función `MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m` que llevará a cabo la recepción y el procesamiento de la señal. Después de configurar el objeto de Matlab `comm.SDRUReceiver` que comunicará el espacio de trabajo de Matlab con la USRP se realizarán los diferentes pasos:

- Obtener la señal recibida por la USRP
- Estimar el canal a través de las secuencias piloto presentes en el preámbulo y obtención de las muestras que hacen referencia a los datos (payload).
- El canal estimado se escribe en un fichero (que será leído por el transmisor cuando necesite realizar la precodificación)
- Para estimar los datos se realiza la recepción de la señal OFDM y se seleccionan las portadoras y símbolos donde cada UE tiene su información
- Se explota la transmisión de secuencias conocidas (*midamble*) para tener una mejor estimación del canal en la recepción, y se obtiene la constelación recibida.

script_UE_1.m

Configuration:

- N (rx antennas)
- IP address
- Carrier Frequency
- IsClockReference (1)

script_UE_2.m

Configuration:

- N (rx antennas)
- IP address
- Carrier Frequency
- IsClockReference (0)

MU_MIMO_Rx_UE_n_USRP.m

- USRP configuration
- Initialize Matlab objects to visualize results
- Generation Pilots in single-carrier
- Receive data from the USRP
- Channel Estimation at the i-th frame
- Write the estimated channel in a file (to be exchanged with the tx)
- Extract Payload in OFDM
- Use midambles to estimate the channel on subcarriers
- Show the constellation of received symbols

Figura 4. Descripción general de las principales funciones para realizar la recepción de la señal en los usuarios

3. Modelo de señal

Esta sección describirá de forma resumida los diferentes aspectos a considerar para la transmisión y recepción de las señales.

4.1 Trama transmitida

La Figura 5 presenta la trama que se transmite que tiene una duración aproximada de unos 83.35 ms. Está compuesta por 2 bloques principales: Preámbulo y datos precodificados. Entre transmisiones de diferentes bloques hay un intervalo de tiempo sin ninguna transmisión que permitirá absorber la dispersión del canal.

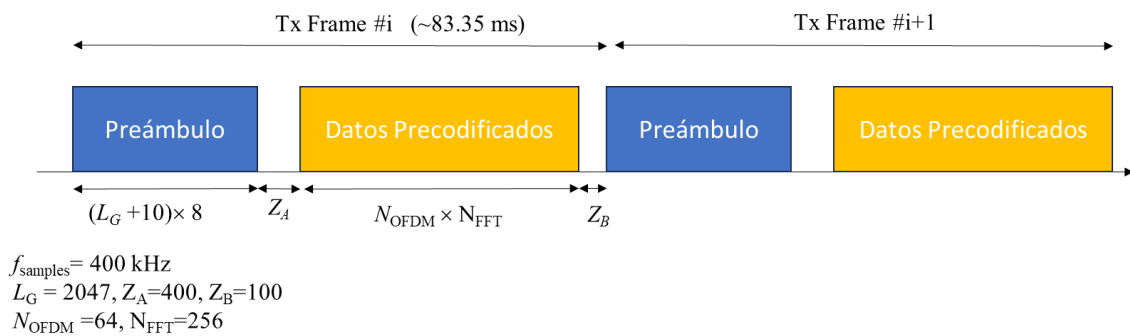


Figura 5. Trama de señal transmitida.

El Preámbulo consiste en transmitir una secuencia pseudoaleatoria independiente por cada antena sin ninguna precodificación. Se puede modelar como una matriz de dimensiones $(M \times (L_G + 10)8)$, con M el número de antenas transmisoras y L_G la longitud de la secuencia piloto, que en nuestro caso viene de las secuencias de Gold de longitud $L_G = 2047$. Para la transmisión de estas secuencias se considera la utilización de un filtro raíz de coseno alzado con 8 muestras por símbolo. La recepción de este preámbulo permitirá tener una estimación del canal inalámbrico en ese momento para toda la banda.

Los datos precodificados para cada usuario se van a transmitir como 64 símbolos OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [BAR-05] y la asignación de recursos se ilustra en la Figura 6, donde existen una serie de recursos compartidos por ambos usuarios (portadoras 4-12) que demandará de una precodificación espacial para eliminar las interferencias, y otros recursos ortogonales para cada usuario (portadoras 49-100 y 149-200). En los recursos asignados se transmitirán datos (recursos en naranja en la Figura 6) y secuencias piloto (o *midambles*) para refinar la estimación del canal (recursos en verde en la Figura 6). Los datos utilizan diferentes modulaciones por portadora (desde 64 QAM hasta 4-QAM), mientras que los *midambles* se transmiten con BPSK. Para este experimento no se ha considerado la utilización de prefijo cíclico (Cyclic Prefix, CP).

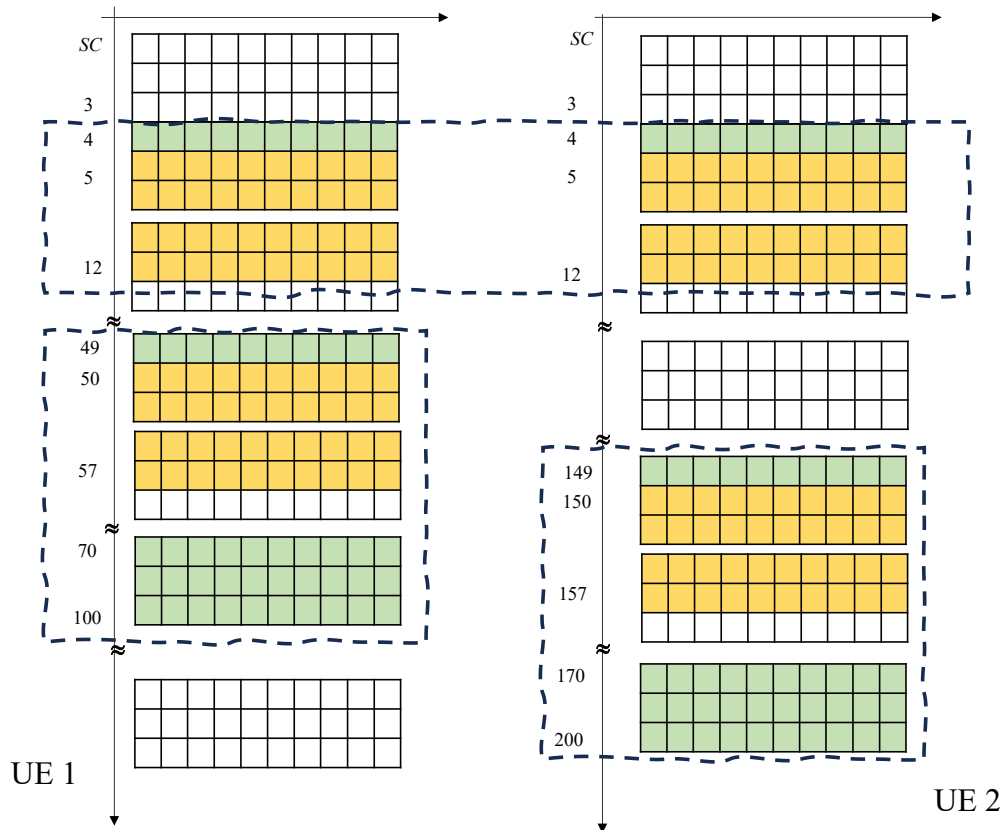


Figura 6. Asignación de los recursos a los diferentes usuarios en términos de portadoras y tiempo. La transmisión utiliza recursos compartidos (portadoras 4-12) y recursos ortogonales (portadoras 49-100 para UE1 y 149-200 para el UE2). Los recursos en “naranja” son destinados para la transmisión de datos, mientras que los recursos en “verde” transmiten secuencias conocidas (midambles) por parte del receptor, que ayudarán a mejorar la estimación del canal en recepción. En los recursos en blanco no se transmite ninguna señal.

4.2 Sincronización en tiempo (inicio de la trama)

Los usuarios necesitan detectar cuando empieza la trama transmisora, esto se puede realizar con la detección de las secuencias piloto presentes en el preámbulo. Al estar formadas por secuencias de Gold de gran longitud, correlando en recepción por las mismas señales obtendremos picos en los instantes que empiezan las secuencias, y por tanto la trama. Con esta información, podremos extraer las muestras que nos permitirán: i) estimar el canal y ii) detectar los datos.

4.3 Estimación de canal

La estimación de canal también se realiza a través de la decodificación del preámbulo presentado en la Figura 5. La señal recibida por el usuario i equipado con N antenas receptoras puede modelarse como,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{P} + \mathbf{V} \quad (1)$$

con \mathbf{P} con dimensiones (M, L_p) una matriz con M el número de antenas transmisoras y L_p el tamaño de la secuencia piloto transmitida, que de acuerdo Figura 5 sería $L_p=(L_G+10)8$, \mathbf{H} es una matriz de dimensiones (N, M) y representa la matriz de canal, \mathbf{Y} modela la señal recibida y es una matriz de dimensiones (N, L_p) y finalmente la matriz \mathbf{V} representa el ruido presente en la comunicación. Las diferentes secuencias piloto son conocidas por los usuarios, por lo que la estimación puede realizarse

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{Y} \text{pinv}(\mathbf{P}) \quad (2)$$

donde $\text{pinv}()$ representa la función pseudo-inversa.

4.4 OFDM

La transmisión de los datos se realiza a través de OFDM. Seguidamente se presentan las principales características de este tipo de transmisión. Asumiendo una comunicación punto a punto (una antena en transmisión y una antena en recepción) la señal se puede modelar como,

$$\tilde{\mathbf{y}}(n) = \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{G} \mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n) \quad (3)$$

donde $\tilde{\mathbf{y}}$, \mathbf{v} son vectores de dimensión $(N_c, 1)$, $\tilde{\mathbf{H}}$, \mathbf{G} son matrices de dimensiones (N_c, N_c) , \mathbf{x} es el vector de símbolos a transmitir de dimensión $(N_c, 1)$. La matriz de canal, $\tilde{\mathbf{H}}$ presenta una estructura Toeplitz y circulante [BAR05], que tiene la siguiente descomposición,

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \cdots & 0 & h_L & h_{L-1} & \cdots & \cdots & h_1 \\ \vdots & h_0 & 0 & \ddots & \ddots & h_L & \cdots & \cdots & \vdots \\ h_L & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & h_L \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & h_L & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_L & h_{L-1} & \cdots & \cdots & \cdots & h_0 \end{bmatrix} = \mathbf{W} \mathbf{\Lambda} \mathbf{W}^H \quad (4)$$

donde la matriz \mathbf{W} es unitaria y puede obtenerse de la Transformada Discreta de Fourier, y $\mathbf{\Lambda}$ es una matriz diagonal de dimensiones (N_c, N_c) , y los elementos de la diagonal principal dados por,

$$\Lambda(i, i) = \sum_{l=0}^L h(l) e^{-j \frac{2\pi i l}{N_c}} \quad (5)$$

Utilizando esta propiedad, y fijando $\mathbf{G} = \mathbf{W}$, después de aplicar un procesamiento a la señal recibida (con \mathbf{W}^H), esta se puede escribir como:

$$\mathbf{z}(n) = \mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}(n) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{x}(n) + \mathbf{W}^H \mathbf{v}(n) \quad (6)$$

En particular, las operaciones $\mathbf{W} \mathbf{x}$, $\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}$ se corresponden a la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT en inglés) de la señal \mathbf{x} y la transformada Discreta de Fourier (DFT en inglés), respectivamente. Cada una de ellas puede realizarse de forma eficiente con la Fast Fourier Transform (FFT), con la longitud de la FFT de N_c .

Como se puede observar el canal equivalente visto por cada símbolo, en general es diferente, excepto en el caso de que el canal pueda asumirse que es plano en frecuencia y en ese caso la matriz es proporcional a la matriz identidad, $\mathbf{\Lambda} \propto \mathbf{I}$.

4.5 Precodificación MIMO OFDM

La extensión a la configuración multiantena para OFDM consiste en considerar la precodificación espacial por portadora, es decir, para la portadora c la señal recibida puede escribirse como,

$$\begin{bmatrix} z_1(c, t) \\ \vdots \\ z_N(c, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,1}(c, c) & \cdots & \Lambda_{1,M}(c, c) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{N,1}(c, c) & \cdots & \Lambda_{N,M}(c, c) \end{bmatrix} \mathbf{F} \begin{bmatrix} x_1(c, t) \\ \vdots \\ x_{N_{streams}}(c, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{v}_1(c, t) \\ \vdots \\ \tilde{v}_N(c, t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde $\Lambda_{n,m}(c, c)$ es el coeficiente de canal en el enlace entre la antena receptor n y la antena transmisora m , en la portadora c , \mathbf{F} es la matriz de precodificación de dimensiones $(M, N_{streams})$, y \tilde{v}_n representa la componente de ruido en la antena receptora n . Como puede apreciarse en (7), la matriz \mathbf{F} debería diseñarse para cada portadora c . En el caso de que la respuesta del canal sea plana en la banda frecuencial, los coeficientes de canal son los mismos en toda la banda.

4.6 Precodificación MIMO en este Taller

Aunque consideraremos que los datos precodificados se transmiten en OFDM, en este taller asumirá que canal se podría considerar plano en la banda de interés. Por esta razón, se considerará la estimación de canal basada en la recepción del preámbulo para realizar la precodificación espacial de los diferentes streams o modos de transmisión. Como se ha comprobado en (7), esta opción no es la óptima pues en canal puede variar a través de las portadoras. La precodificación considerada aquí, realizará una separación espacial de los terminales, sin embargo, no realizará una ecualización del canal y existirá un error que se propagará a través de las portadoras y símbolos OFDM. Este taller, analizará el impacto del error obtenido con esta aproximación.

La señal transmitida con la información se puede describir como una matriz de dimensiones $(M, N_{OFDM}N_{FFT})$,

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{F}_{00}\mathbf{s}_{00} + \mathbf{F}_{01}\mathbf{s}_{01} + \mathbf{F}_1\mathbf{s}_1 + \mathbf{F}_2\mathbf{s}_2 \\ \mathbf{s}_a &= f(\mathbf{W}[\mathbf{x}_{a,1} \dots \mathbf{x}_{a,N_{OFDM}}]) \end{aligned} \quad (8)$$

donde los símbolos \mathbf{s} de dimensión $(1, N_{OFDM}N_{FFT})$ hacen referencia a la señal temporal OFDM a través de la función $f()$ que realiza la transformación de matriz a vector de todos los símbolos a los que se le aplica la FFT. La señal $\mathbf{s}_{00}, \mathbf{s}_{01}$ solo tienen información en las portadoras compartidas (4-12 y ceros en las restantes) con mensajes superpuestos para los 2 usuarios, mientras $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ hacen referencia a las señales temporales OFDM que contienen información solo para el usuario 1 (49-57, 70-100 y ceros en las restantes) y usuario 2 (149-157, 170-200, y ceros en las restantes), respectivamente. Finalmente, $\mathbf{F}_{00}, \mathbf{F}_{01}, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ son los filtros espaciales que se aplican de dimensión $(M, 1)$. La señal recibida por los usuarios se puede escribir como,

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_1 &= \mathbf{H}_1\mathbf{X} + \mathbf{W}_1 = \mathbf{H}_1\mathbf{F}_{00}\mathbf{s}_{00} + \mathbf{H}_1\mathbf{F}_{01}\mathbf{s}_{01} + \mathbf{H}_1\mathbf{F}_1\mathbf{s}_1 + \mathbf{H}_1\mathbf{F}_2\mathbf{s}_2 + \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{Y}_2 &= \mathbf{H}_2\mathbf{X} + \mathbf{W}_2 = \mathbf{H}_2\mathbf{F}_{00}\mathbf{s}_{00} + \mathbf{H}_2\mathbf{F}_{01}\mathbf{s}_{01} + \mathbf{H}_2\mathbf{F}_1\mathbf{s}_1 + \mathbf{H}_2\mathbf{F}_2\mathbf{s}_2 + \mathbf{W}_2 \end{aligned} \quad (9)$$

donde $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ son matrices de dimensión (N, M) , y $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2$ son matrices de dimensión $(N, N_{OFDM}N_{FFT})$. Considerando que la recepción de las secuencias pilotos tenemos una estimación de canal dada por (2), $\hat{\mathbf{H}}_1, \hat{\mathbf{H}}_2$. Para la señal que va dirigida a los diferentes usuarios en los recursos ortogonales utilizaremos el filtro adaptado,

$$\mathbf{F}_1 = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \frac{1}{\sqrt{\text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_1^H \hat{\mathbf{H}}_1)}} \hat{\mathbf{H}}_1^H, \quad \mathbf{F}_2 = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \frac{1}{\sqrt{\text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_2^H \hat{\mathbf{H}}_2)}} \hat{\mathbf{H}}_2^H \quad (10)$$

donde la variable β se utilizará para asegurar que la potencia de la señal transmitida es constante. En recepción una vez después de aplicar la recepción OFDM, la señal recibida en los recursos ortogonales seleccionados a través de $f()$ se puede escribir el símbolo n OFDM como

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}_1) &\xrightarrow{\text{yields}} \mathbf{z}_1(n) = \mathbf{\Lambda}_1 \mathbf{x}_1(n) + \tilde{v}_1(n) \\ f_2(\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}_2) &\xrightarrow{\text{yields}} \mathbf{z}_2(n) = \mathbf{\Lambda}_2 \mathbf{x}_2(n) + \tilde{v}_2(n) \end{aligned} \quad (10)$$

donde las dimensiones de los vectores y matrices dependen del número de portadoras que se ha asignado para cada transmisión. Si el canal fuera plano en frecuencia y la estimación de canal es ideal entonces $\mathbf{\Lambda}_1 = \mathbf{\Lambda}_2 = \mathbf{I}_{N_{FFT}}$.

En los recursos compartidos donde se quiere separar las transmisiones utilizando la dimensión espacial, se utilizará el siguiente filtro espacial,

$$[\mathbf{F}_{00} \quad \mathbf{F}_{01}] = \begin{cases} [\mathbf{F}_1 \quad \mathbf{F}_2], & \text{Filtro adaptado} \\ \frac{1}{\sqrt{\beta}} \text{norm} - \text{pinv}([\hat{\mathbf{H}}_1^H \quad \hat{\mathbf{H}}_2^H]), & \text{Forzador de ceros} \end{cases} \quad (11)$$

La primera opción es el filtro adaptado, mientras que la segunda opción considera el forzador de ceros considerando la función pseudo-inversa normalizada. La señal recibida en las portadoras compartidas por los usuarios se puede expresar como,

$$\begin{aligned} f_{00,01}(\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}_1) &\xrightarrow{\text{yields}} \mathbf{z}_{00} = \mathbf{\Lambda}_{11} \mathbf{x}_{00} + \mathbf{\Lambda}_{12} \mathbf{x}_{01} + \tilde{v}_{00} \\ f_{00,01}(\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{y}}_2) &\xrightarrow{\text{yields}} \mathbf{z}_{01} = \mathbf{\Lambda}_{22} \mathbf{x}_{01} + \mathbf{\Lambda}_{21} \mathbf{x}_{00} + \tilde{v}_{01} \end{aligned} \quad (12)$$

donde $\mathbf{\Lambda}_{ij}$ es el canal equivalente para la señal que contiene el mensaje j y se recibe en el usuario i . Si la separación espacial fuera correcta, se esperararía tener $\mathbf{\Lambda}_{12} = \mathbf{\Lambda}_{21} \approx \mathbf{0}$. Esto se conseguiría con el forzador de ceros si existe una estimación precisa del canal, y con el filtro adaptado si las firmas espaciales de cada usuario permiten su separación.

4. Ejercicios prácticos

Como se ha introducido anteriormente, la utilización de las SDRs facilita la experimentación de las comunicaciones inalámbricas y la validación de conceptos de diseño obtenidos por simulación teórica. No obstante, debido a la complejidad de los sistemas inalámbricos, comúnmente el análisis teórico de alguno de los bloques puede realizar consideraciones o simplificaciones del comportamiento de otros bloques.

Estos ejercicios prácticos, a través de un ejemplo sencillo, están enfocados para:

- Familiarizarse con las SDRs (USRPs) y Matlab
- Introducir algunos aspectos prácticos de las comunicaciones MIMO multi-usuario y OFDM
- Identificar los principales aspectos a tener en cuenta para la correcta recepción de la señal: tipo de filtro espacial, ecualización de canal, número de modos de transmisión que se pueden soportar

La práctica está organizada en la realización de una serie de ejercicios, ejecutados de acuerdo con la siguiente guía.

Guía de experimentos

4.1 Experimento 1: Utilización del precodificador Zero Forcing

Los ficheros a ejecutar son:

- Experimentos en laboratorio
 - Ex1_script_BS.m, Ex1_script_UE1.m, y Ex1_script_UE2.m, en 3 diferentes entornos de Matlab. Durante la ejecución se podrá observar las constelaciones de los símbolos en diferentes portadoras.
- Procesado offline de ficheros previamente almacenados
 - Se puede ver los resultados para cada uno de los usuarios ejecutando Ex1_offline_script_UE1.m, y Ex1_offline_script_UE2.m

En el ejemplo de la Figura 7-arriba-izquierda se muestran las constelaciones en las portadoras 5 y 9 para el UE1, mientras Figura 7-arriba-derecha presenta las constelaciones recibidas en las mismas portadoras (5 y 9) pero para el UE2. Por otro lado, Figura 7-abajo-izquierda representa las constelaciones recibidas en las portadoras 50 y 55 para el UE1, y Figura 7-abajo-derecha está dedicada para la constelación de la señal recibida en las portadoras 150 y 155 del asignadas al UE2.

Pregunta 1.1: Aunque se observa que los puntos de la constelación se identifican correctamente, para los 4 casos se observa que las constelaciones tienen alguna rotación, en el caso de la Figura 7 es más pronunciado para la señal recibida en los recursos asignados solo para los UE1 y UE2 (portadoras 50,55, 150, 155), Por qué?

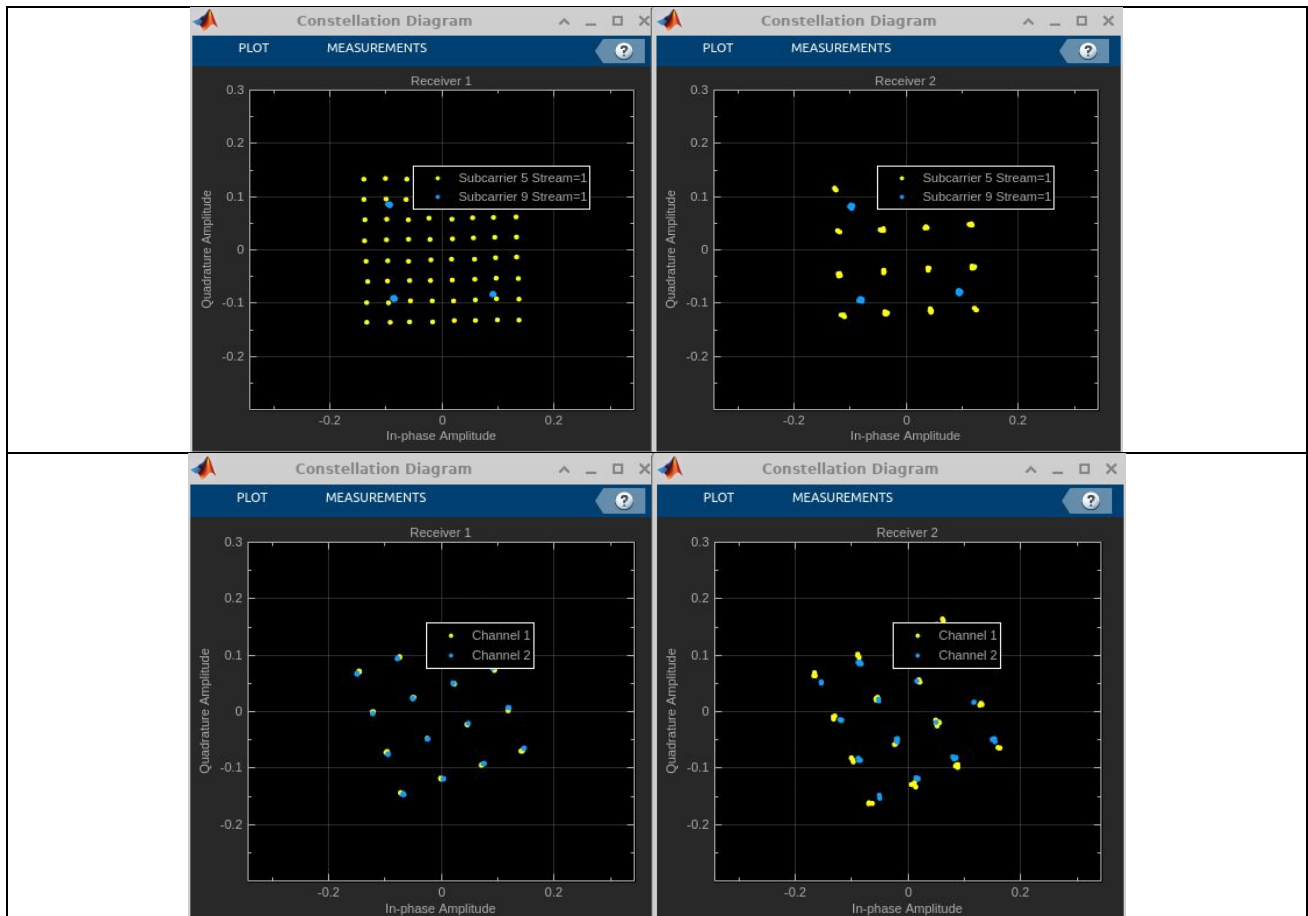


Figura 7. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 1

Las causas que podrían ser responsables serían:

- **Error de Frecuencia transmisor-receptor:** La configuración de este experimento utiliza que todas las SDRs comparten las señales de sincronismo, por lo que el error de frecuencia que puede existir debería ser negligible.
- **Variación del canal en tiempo.** Existe posibilidad de revisar cómo evoluciona el canal reportado por cada UE en cada trama si en el script se especifica que el cada UE genere un fichero para guardar la señal, Rx_input.save_rx_signal.
- **Variación del canal en frecuencia.** La estimación de canal se hace con el preámbulo que ocupa toda la banda y que es óptima cuando el canal no presenta selectividad en frecuencia. Sin embargo, el método implementado en este taller establece que la señal no queda ecualizada para la recepción de los datos, ver ecuación (10). ¿Cómo varía el canal entre las diferentes portadoras?
Para ver esta relación podemos explotar las secuencias midamble que se transmiten en las portadoras 70-100 para el UE1 y 170-200 para el UE2, ver Figura 6.

Pregunta 1.2: Si los símbolos de las constelaciones que se muestran en la Figura 7 se corresponden para las portadoras UE1: 5,9, 50, 55 y para el UE2: 5, 9, 150, 155. ¿Cómo deberíamos modificar nuestro código de la función Ex1_MU_MIMO_RX_UE_n_USRP.m o Ex1_offline_MU_MIMO_RX_UE_n_USRP.m?

```

%% Lines 237 -246
%% midamble
%%
y = fftOut(4,:).';
%% Is there any phase offset to compensate??
%%
%%
%%
%%
%% Lines 268-275
%% midamble
%%
y = fftOut(SC_Orth_UE-1,:).';
%% Is there any phase offset to compensate??
%%
%%
%%
y = fftOut(SC_Orth_UE,:).';      % Extract Subcarrier 50/150
%% Is there any phase offset to compensate??
%%
%%
%%
%% Lines 289-294
y = fftOut(SC_Orth_UE+5,:).';    % Extract Subcarrier 50/150+5
%% Is there any phase offset to compensate??
%%
%%
%%
%% Lines 300-306
%% Offsets in the midamble vs carriers 70-100 or 170-200
y_matrix = fftOut(SC_Orth_UE+20:SC_Orth_UE+50,:); %% matrix
%% Is there any phase offset to compensate??
%%
%%
%%
%%

```

4.2 Experimento 2: Utilización del precodificador Matched Filter

Los ficheros a ejecutar serán:

- Experimentos en laboratorio
 - Ex2_script_BS.m, Ex2_script_UE1.m, y Ex2_script_UE2.m, en 3 diferentes entornos de Matlab.
- Procesado offline de ficheros previamente almacenados
 - Se puede ver los resultados para cada uno de los usuarios ejecutando Ex2_offline_script_UE1.m, y Ex2_offline_script_UE2.m

Durante la ejecución se podrá observar las constelaciones de los símbolos en diferentes portadoras. En el ejemplo de la Figura 8-arriba-izquierda se muestran las constelaciones en las portadoras 5 y 9 para el UE1, mientras Figura 8-arriba-derecha presenta las constelaciones recibidas en las mismas portadoras (5 y 9) pero para el UE2. Por otro lado, Figura 8-abajo-izquierda representa las constelaciones recibidas en las portadoras 50 y 55 para el UE1, y Figura 8-abajo-derecha está dedicada para la constelación de la señal recibida en las portadoras 150 y 155 del asignadas al UE2.

En este caso se ha aplicado la corrección de error de fase en recepción derivada en la sección anterior y se observa que la constelación de los símbolos en la portadoras ortogonales está corregida. Sin embargo:

Pregunta 2.1: *¿Por qué no se reciben correctamente los símbolos en las portadoras compartidas?*

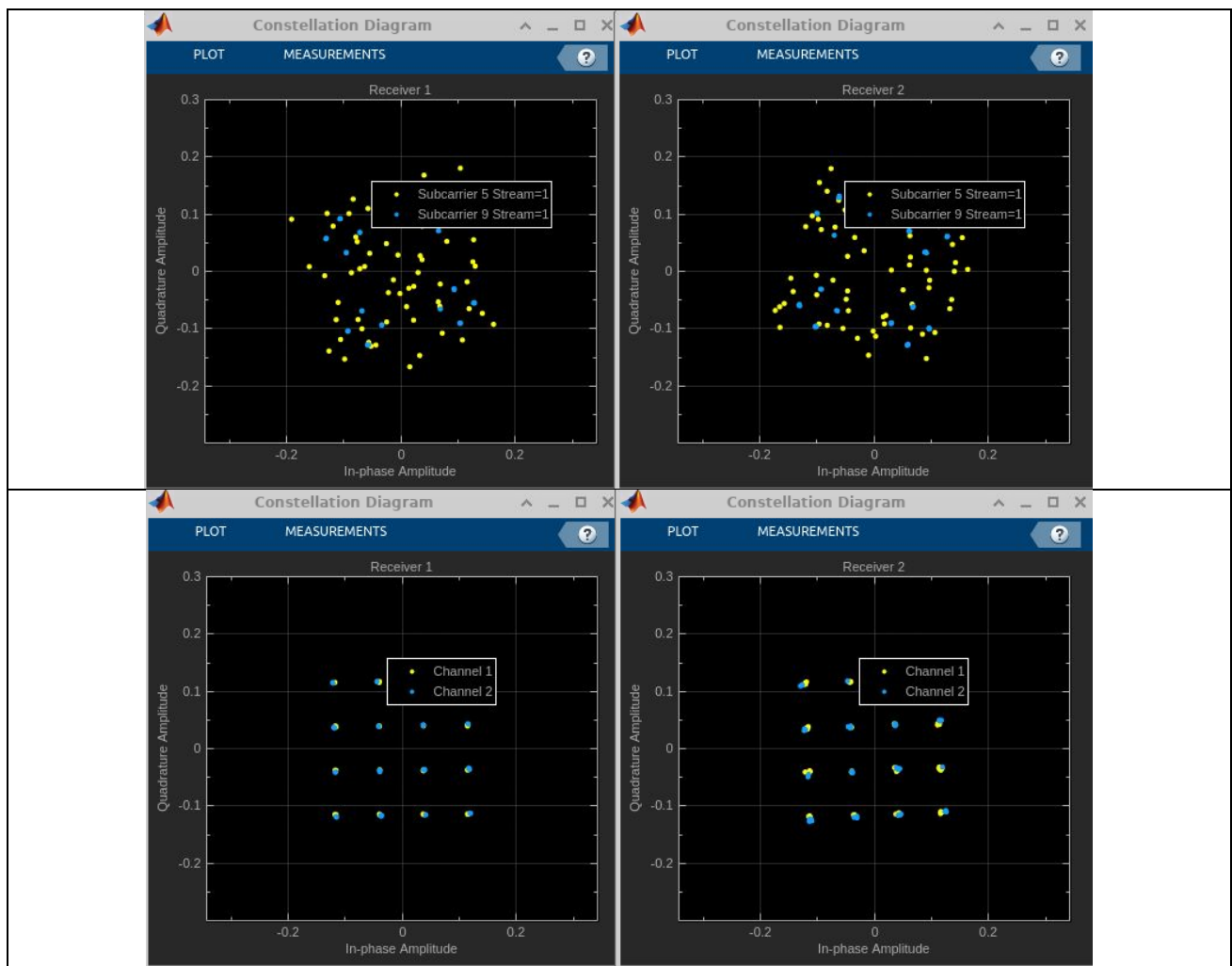


Figura 8. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 2

4.3 Experimento 3: Utilización de múltiples antenas en recepción

Los ficheros a ejecutar serán:

- Experimentos en laboratorio
 - Ex3_script_BS.m, Ex3_script_UE1.m, y Ex3_script_UE2.m, en 3 diferentes entornos de Matlab.
- Procesado offline de ficheros previamente almacenados
 - Se puede ver los resultados para cada uno de los usuarios ejecutando Ex3_offline_script_UE1.m, y Ex3_offline_script_UE2.m

Durante la ejecución se podrá observar las constelaciones de los símbolos en diferentes portadoras. En el ejemplo de la Figura 9-arriba-izquierda se muestran las constelaciones en las portadoras 5 y 9 para el UE1, mientras Figura 9-arriba-derecha presenta las constelaciones recibidas en las mismas portadoras (5 y 9) pero para el UE2. Por otro lado, Figura 9-abajo-izquierda representa las constelaciones recibidas en las portadoras 50 y 55 para el UE1, y Figura 9-abajo-derecha está dedicada para la constelación de la señal recibida en las portadoras 150 y 155 del asignadas al UE2. A diferencia de los casos anteriores, ahora cada UE está equipado con $N=2$ antenas, y se aprovechan para que el transmisor intente transmitir 2 modos a cada usuario.

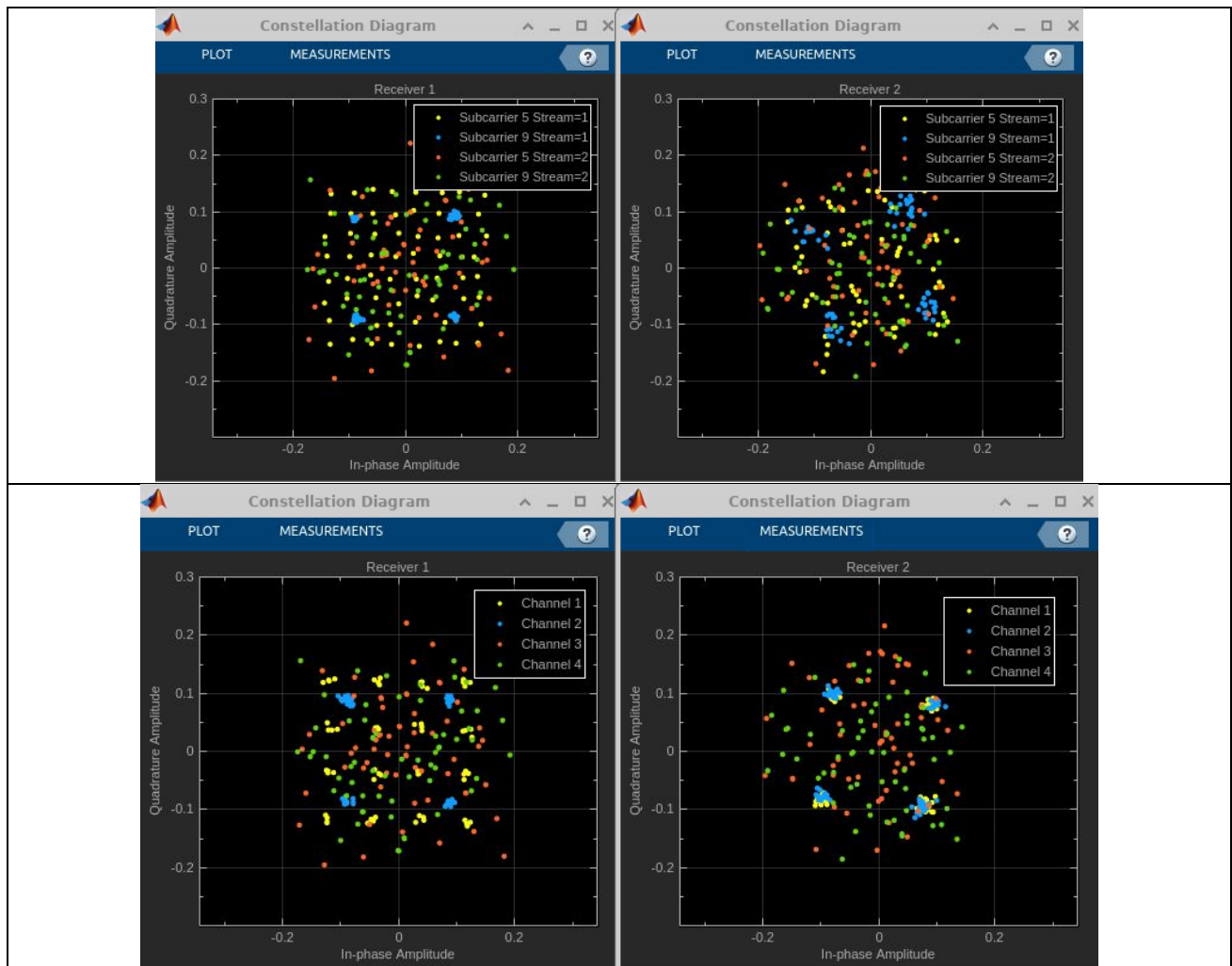


Figura 9. Ejemplo de constelaciones recibidas en el Experimento 3

A la vista de los resultados los usuarios no pueden recibir todos sus datos en los diferentes modos.

Pregunta 3.1: ¿Cuál puede ser el motivo si no existen errores en la estimación de canal o errores de frecuencia/fase? Pista: utilizar la variable: `Incremental_H_m` que almacena los coeficientes de canal.

5. Referencias

- [M-CUSRP] <https://es.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/index.html>
- [M-FSDR] <https://es.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/findsdru.html>
- [M-SPECA1] <https://es.mathworks.com/help/dsp/ref/spectrumanalyzer.html>
- [M-SPECA2] <https://es.mathworks.com/help/dsp/ug/configure-spectrum-analyzer.html>
- [M-CONST] <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.constellationdiagram-system-object.html>
- [M-Release] <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/matlab.system.releasesystemobject.html>
- [M-step] <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/step.html>
- [M-SDRuTx] <https://es.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/comm.sdrutransmitter-system-object.html>
- [M-FileReader] <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.basebandfilereader-system-object.html>
- [M-FileWriter] <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/comm.basebandfilewriter-system-object.html>
- [ETT-UHD] <https://kb.ettus.com/UHD>
- [ETT-UHD2] [https://kb.ettus.com/Building_and_Installing_the_USRP_Open-Source_Toolchain_\(UHD_and_GNU_Radio\)_on_Linux](https://kb.ettus.com/Building_and_Installing_the_USRP_Open-Source_Toolchain_(UHD_and_GNU_Radio)_on_Linux)
- [ETT-X310] https://files.ettus.com/manual/page_usrp_x3x0.html
- [ETT-OCTO] https://kb.ettus.com/OctoClock_CDA-2990#OctoClock
- [SDR] https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_definida_por_software
- [BAR05] S. Barbarossa, Multiantenna Wireless Communication Systems. Artech House. 2005.



Advanced research for everyday life