

Anexos

Anexo A

Modulaciones multiportadora

En el presente Anexo A.1 se propone una extensa explicación teórica del formato de modulación multiportadora de 4G: OFDM. Asimismo, se proporcionan las estructuras de las tramas de transmisión de los nuevos esquemas de modulación 5G: FBMC, GFDM y UFMC.

Índice general

A.1. OFDM	63
A.1.1. Formulación matemática	64
A.1.2. Algoritmo de implementación	66
A.1.3. Propiedades básicas	68
A.2. Estructura de las tramas de transmisión	72
A.2.1. OFDM	72
A.2.2. FBMC	72
A.2.3. GFDM	73
A.2.4. UFMC	73

A.1. OFDM

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) pertenece al denominado grupo de modulaciones multiportadora, del inglés *Multicarrier Modulation (MCM)*. En ellas, los datos de información que poseen una alta tasa de transmisión son divididos en una multitud de subportadoras de tasa menor. Las ventajas principales de OFDM son su robustez frente a la

dispersión de canal, así como la facilidad de aplicar tanto estimación de fase como estimación de canal para un entorno variante en el tiempo. El gran desarrollo producido en la industria de los DSP durante los años 90 trajo consigo la llegada de los chips VLSI-CMOS de tecnología de silicio. Su gran capacidad les permitía soportar la alta carga computacional requerida, hecho que coronó a OFDM como modulación principal en tecnologías radio, tales como *Digital Video Broadcasting (DVB)*, Wi-Fi¹ *Local Area Network (LAN)*, o el ya mencionado estándar 4G. Sin embargo, cuenta con tres desventajas principales que impiden su elección como forma de onda para el futuro estándar 5G: alta radiación fuera de banda², un alto *Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)* y una alta sensibilidad a los ruidos de fase y frecuencia. Dicho parámetro PAPR, definido por la Ecuación A.1, no es más que la relación de cuadrados entre la amplitud de pico de la señal y su valor *Root Mean Square (RMS)*:

$$PAPR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{|x_{peak}|^2}{x_{RMS}^2} \right) \quad (A.1)$$

Para comprender las ventajas e inconvenientes que este tipo de modulación presenta, es necesario acudir a un estudio más profundo en el que se plantee qué matemáticas la definen, qué algoritmos la implementan, qué propiedades presenta y qué parámetros posee.

A.1.1. Formulación matemática

La señal analógica $x(t)$ OFDM transmitida se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^N d_{ki} x_k(t - iT_s) \quad (A.2)$$

$$x_k(t) = \prod(t) e^{j2\pi f_k t} \quad (A.3)$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T_s \\ 0 & t \leq 0, t > T_s \end{cases} \quad (A.4)$$

- N Número total de subportadoras
- d_{ki} Símbolo i -ésimo transportado por subportadora k -ésima
- $x_k(t)$ Forma de onda de la subportadora k -ésima
- T_s Periodo de símbolo
- f_k Frecuencia de la subportadora k -ésima
- $\prod(t)$ Filtro de conformación de pulso

¹Recogido por la familia de estándares IEEE 802.11a/g

²Emisión de un canal fuera de su banda frecuencial, contribuyendo al ruido total del canal adyacente afectado

siendo generada por un Modulador I/Q, mediante la siguiente expresión:

$$x = \text{Re} \left\{ d e^{j2\pi f t} \right\}. \quad (\text{A.5})$$

El equivalente matemático de generación para tiempo discreto para $x[n]$ es:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} d_{ki} e^{j2\pi f_k t} \quad (\text{A.6})$$

Para comprender el funcionamiento exacto de este tipo de modulación multiportadora, regresamos a la Ecuación A.2. Cada símbolo d_{ki} , modulado en la capa física mediante QAM ó QPSK, es multiplicado por la forma de onda de la portadora k -ésima, que para OFDM corresponde con la respuesta frecuencial del pulso rectangular de valor unidad de la Ecuación A.4: la función $\text{sinc}(x)$. Además, ésta está desplazada a su frecuencia correspondiente mediante el producto de una exponencial compleja, expresado en la Ecuación A.3. Es aquí donde reside el gran valor de OFDM como modulación: el máximo de la función sinc correspondiente a la portadora k -ésima coincide con los nulos del resto de portadoras; las subportadoras son ortogonales entre sí, como podemos ver en la Figura A.3.

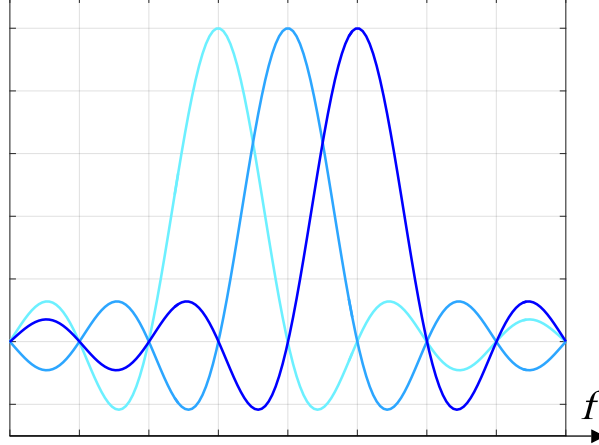


Figura A.1: Forma de onda de las subportadoras OFDM

Gracias a esta propiedad, las subportadoras que se superponen entre sí en frecuencia no imposibilitan su posterior demodulación en recepción, y proporcionan una alta eficiencia espectral. Cuando se introdujo OFDM, este tipo de planteamiento supuso una revolución (ver Figura A.2.a). Las modulaciones multiportadora previas usaban subportadoras no ortogonales que no se superponían (ver Figura A.2.b), proveyendo una eficiencia espectral reducida [26].

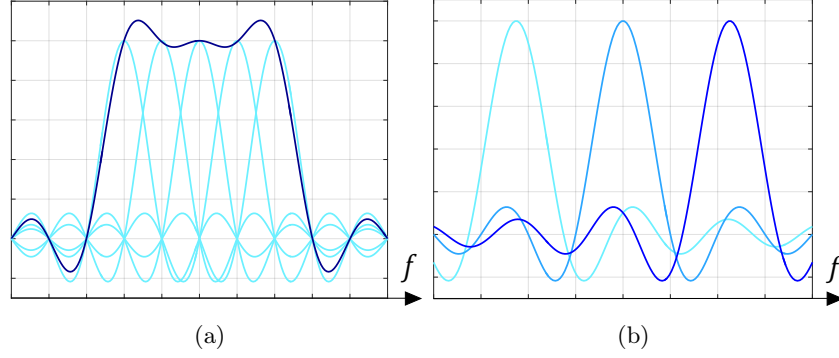


Figura A.2: (a) Espectro de la señal OFDM con su característico rizado fuera de banda, (b) Subportadoras no ortogonales

Si tomamos un símbolo δ_k cualquiera ya modulado mediante OFDM, éste estará afectado por el resto de subportadoras $l \neq k$. Estudiando matemáticamente cualquiera de los casos, *v.gr.* para un l cualquiera distinto de k :

$$\begin{aligned} \delta_{kl} &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} x_k x_l^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_k - f_l)t} dt = \\ &= e^{j\pi(f_k - f_l)T_s} \frac{\text{sen}(\pi(f_k - f_l)T_s)}{\pi(f_k - f_l)T_s} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

donde podemos ver que si se cumple la condición:

$$f_k - f_l = m \frac{1}{T_s} \quad (\text{A.8})$$

las frecuencias de dos subportadoras estarán separadas un múltiplo m de la inversa del periodo de símbolo T_s , satisfaciendo así la propiedad de ortogonalidad y pudiendo ser recuperadas mediante filtros adaptados sin presentar *ICI*, o interferencia entre subportadoras adyacentes.

A.1.2. Algoritmo de implementación

Tal y como primeramente se mencionó, en 1971, OFDM puede desarrollarse mediante la *DFT* [27]. Partiendo de la Ecuación A.2, si muestreamos $x(t)$ a cada intervalo $\frac{T_s}{N}$, obtenemos para la muestra m -ésima:

$$x_m|_{t=\frac{T_s}{N}} = \sum_{k=1}^N d_k e^{j2\pi f_k \frac{(m-1)T_s}{N}} \quad (\text{A.9})$$

donde aplicandole la condición de ortogonalidad $f_k = \frac{k-1}{T_s}$ a partir de la Ecuación A.8, obtenemos:

$$x_m = \sum_{k=1}^N d_k e^{j2\pi \frac{(k-1)(m-1)}{N}} \quad (\text{A.10})$$

y si la comparamos con la conocida fórmula de la *IDFT* para una secuencia de N números complejos:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \frac{n}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k e^{j2\pi k \frac{(n-1)}{N}} \quad (\text{A.11})$$

vemos cómo ambas Ecuaciones A.10 y A.11 coinciden; el modulador OFDM puede implementarse mediante la IDFT. Gracias a la existencia del algoritmo eficiente *Fast Fourier Transform (FFT)* que implementa la DFT y reduce el número de multiplicaciones complejas de N^2 a $\frac{N}{2} \log_2(N)$, así como la relativa facilidad a la hora de implementar el sistema con una cantidad reducida de osciladores y filtros de RF, la arquitectura OFDM torna relativamente simple. Su complejidad dependerá de la de implementación del algoritmo FFT. Cabe por último destacar qué valores óptimos han de elegirse para implementar correctamente este tipo de MCM:

N Múltiplo de 2, condicionado por la implementación eficiente del algoritmo FFT

f_s Período $\frac{k-1}{T_s}$

k $\in [k_{\min} + 1, k_{\min} + N]$, con $k_{\min} \in \mathbb{Z}$, aunque elegidas por convención dos principales configuraciones:

- a) $k \in [1, N]$
- b) $k \in [-\frac{N}{2} + 1, \frac{N}{2}]$

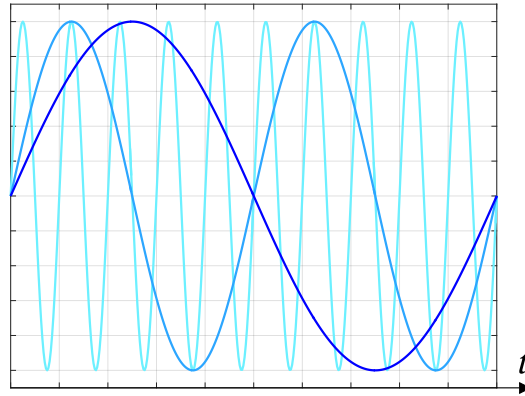


Figura A.3: Variación en frecuencia $e^{j2\pi f_k t}$ de las distintas subportadoras k

A.1.3. Propiedades básicas

Prefijo cíclico Una de las ventajas principales de OFDM es su robustez frente a canales dispersivos, causantes de la presencia de ICI e ISI. La técnica que permite combatir dichos fenómenos es la inserción del denominado prefijo cíclico, o *CP*. Cuando dos subportadoras, sean k y l , con $l \neq k$, se ven afectadas distintamente por un mismo canal dispersivo, una se desplaza temporalmente respecto de la otra un tiempo t_d (ver Figura A.4).

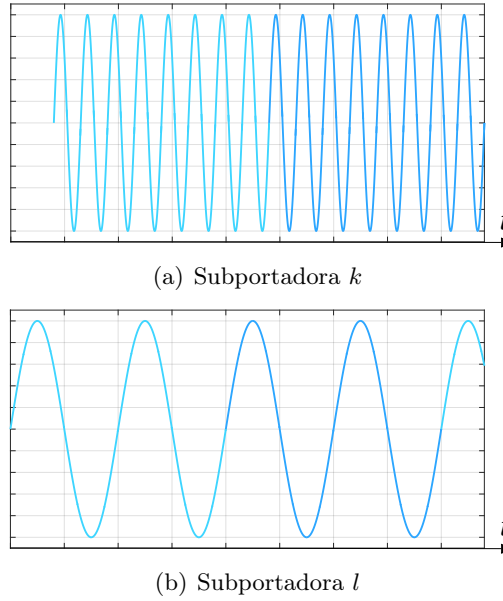


Figura A.4: Subportadoras en canal dispersivo: (a) Subportadora k desplazada t_d respecto T_s óptimo, (b) Subportadora l con T_s óptimo

Con el objetivo de combatir este desfase entre símbolos causante de ISI, durante un determinado intervalo de tiempo, o «intervalo de guarda» Δ_g , se inserta al comienzo del símbolo una copia idéntica a la parte final de la ventana DFT correspondiente a dicho símbolo (ver Figura A.5).

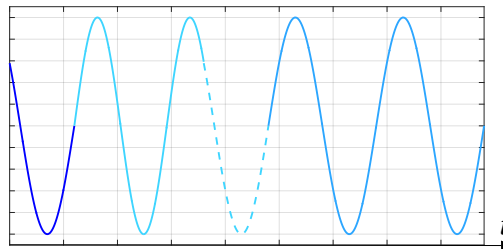


Figura A.5: Inserción de prefijo cíclico en subportadora l como copia de su parte final, en línea discontinua

Si añadimos por tanto el prefijo cíclico, el tiempo de símbolo total T_s será la suma del tiempo de observación de la ventana DFT, t_s , más el intervalo de guarda Δ_g escogido:

$$T_s = \Delta_g + t_s. \quad (\text{A.12})$$

De este modo, si como decíamos la subportadora k de la Figura A.6 se ve afectada por la dispersión de canal un tiempo t_d , siempre que $t_d < \Delta_g$ se cumpla, durante t_s se podrá integrar correctamente todo el símbolo completo. Esto se debe a que la parte final que ha sido desplazada por t_d fuera de t_s aparece de nuevo al principio proveniente de la copia exacta que el prefijo cíclico conforma, aunque éste trozo presentará una variación de fase.

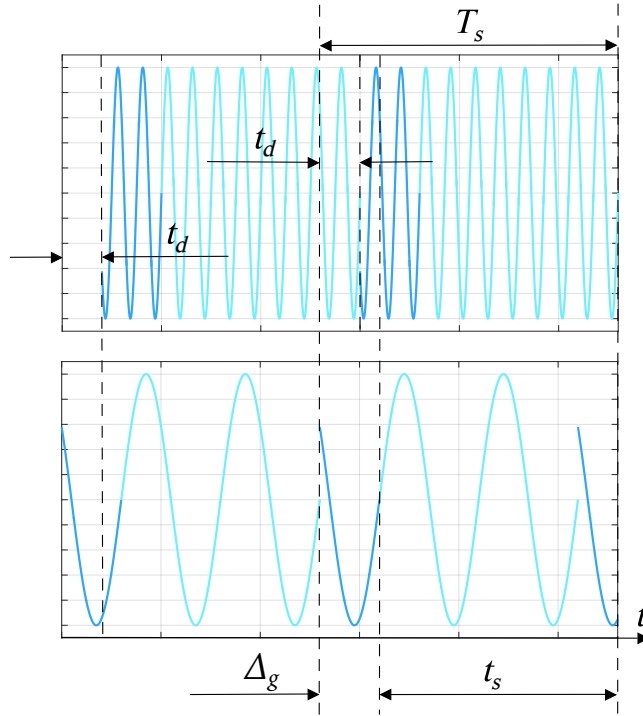


Figura A.6: Representación visual de los tiempos clave para la correcta recuperación de un símbolo OFDM en presencia de propagación multicamino

Debido a dicha variación, deberá aplicarse una estimación de símbolo para cada subportadora con el objetivo de demodular todos los símbolos correctamente. Este procedimiento se denomina «estimación de canal».

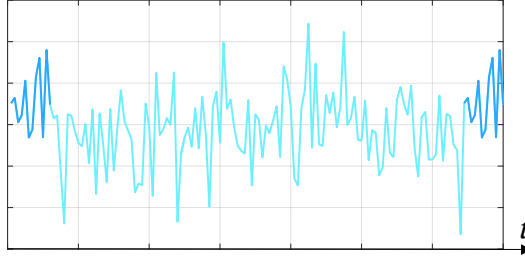


Figura A.7: Símbolo OFDM compuesto por N subportadoras, con inserción de prefijo cíclico como copia de su parte final

Como podemos observar en la Figura A.7, OFDM pertenece al tipo de modulaciones de envolvente no constante. Esto se debe a que las subportadoras que la forman, tal y como se ha visto en la Figura A.3, poseen frecuencias distintas de modulación. El hecho de que una señal posea una envolvente no constante puede provocar una degradación en las prestaciones del canal de comunicaciones al pasar por un sistema no lineal, debido principalmente a su comportamiento irregular en frecuencia que podría originar radiación fuera de banda.

Eficiencia espectral A raíz de lo visto en la Sección A.1.1, así como lo comprobado en la Figura A.2.a, OFDM es un tipo de modulación multiportadora en el que cada una de las subportadoras que la conforman están filtradas por la función pulso rectangular $\Pi(t)$. Por ello, el canal adyacente se verá afectado por las colas que decaen de la función $\text{sinc}(x)$. Podría resultar inteligente estudiar qué filtros alternativos al clásico rectangular producen menor radiación fuera de banda. Como alternativa principal, se propuso el uso del filtro de tipo «coseno realzado»³. Éste, para según que determinada configuración, y cuya fórmula matemática viene definida en la Ecuación A.13, puede reducir tanto la radiación fuera de banda como la ISI producida.

$$|H(f)| = \begin{cases} 1 & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ 0,5 + 0,5 \cdot \cos\left(\frac{\pi T}{\beta} \cdot \left[|f| - \frac{1-\beta}{2T}\right]\right) & \frac{1-\beta}{2T} < |f| < \frac{1+\beta}{2T} \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

Con $0 \leq \beta \leq 1$, como β factor de «roll-off», que determinará la forma de onda del filtro aplicado, tal y como podemos comprobar en la Figura A.8. Para $\beta = 0$, el filtro coseno realzado corresponderá con la ventana rectangular, base OFDM.

³Correspondiente a la implementación de un *Low Pass Filter (LPF)* de Nyquist

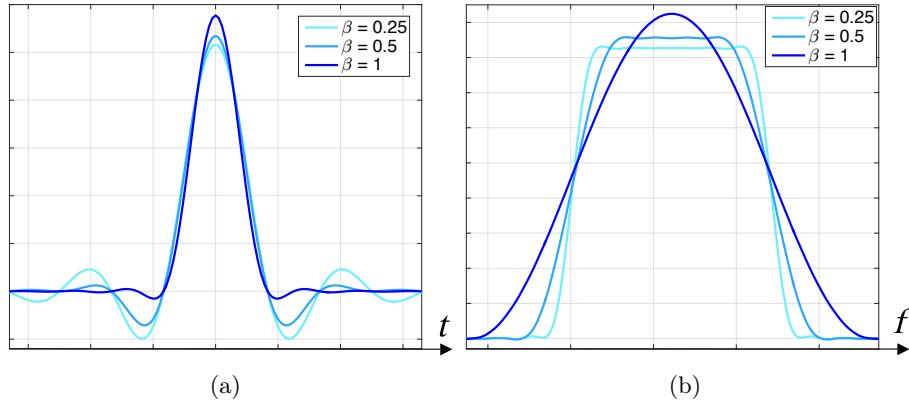


Figura A.8: (a) Respuesta impulsional $h(t)$ del filtro tipo coseno realzado, (b) Respuesta frecuencial $H(f)$

PAPR Tal y como se ha expuesto, OFDM está formada por un número N de subportadoras moduladas a distintas frecuencias f_k . Pudiera darse el caso que todas ellas se sumasen coherentemente, originando, para ese instante t_i , una potencia N veces superior a la potencia media de la señal; el PAPR de la señal, calculado mediante la Ecuación A.1, sería elevado. A parte del aumento en la complejidad del diseño de los conversores *ADC* y *DAC*, un elevado PAPR afectaría de manera negativa al comportamiento de un amplificador. Para conseguir máxima eficiencia energética a la hora de trabajar con él, se busca trabajar en su punto de saturación. Si una señal presentase un PAPR elevado, los picos de ésta a la entrada de dicho amplificador no serían amplificados, provocando un comportamiento no deseado en el que sólo una parte de la señal sería amplificada. Como solución a esta problemática se propone la denominada técnica de «clipping», en el que los picos de la señal son recortados, con la contrapartida de provocar distorsión de señal y reducción de prestaciones. Este es uno de los mayores problemas que presenta la implementación de este tipo de modulación multiportadora.

A.2. Estructura de las tramas de transmisión

Se presentan las estructuras típicas de las tramas de transmisión de los esquemas de modulación candidatos al 5G. Tal y como se explica en los Capítulos 1 y 2 respecto a su implementación matemática y sus parámetros característicos, dichos esquemas son obtenidos como evolución de OFDM y responden a una serie de modificaciones sobre el paradigma inicial.

A.2.1. OFDM

Como elemento principal de esta Sección, se propone la forma de onda típica de una ráfaga de datos OFDM, contenida en la Figura A.9. En ella podemos apreciar un claro ejemplo de envolvente no constante y alto PAPR.

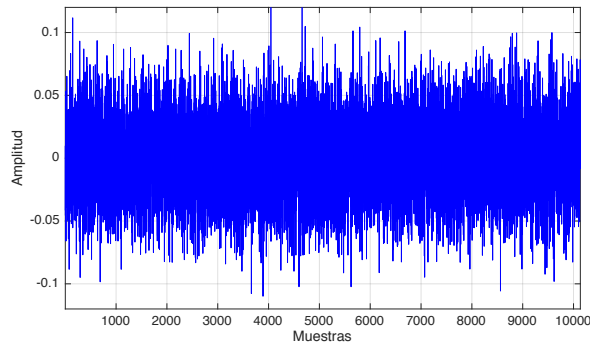


Figura A.9: Ráfaga de datos de transmisión OFDM

A.2.2. FBMC

La Figura A.10 contiene la estructura de una trama de transmisión FBMC. A partir de ella podemos destacar sus 3 intervalos característicos: la transición inicial, la transmisión de datos, y la transición final.

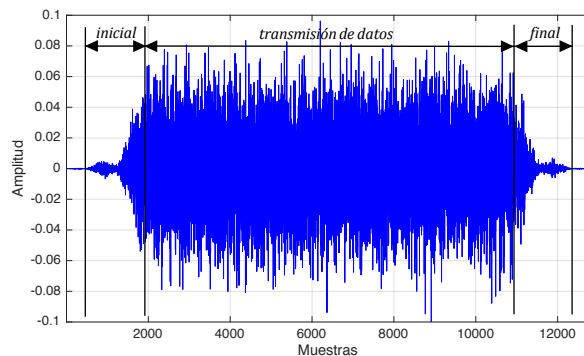


Figura A.10: Ráfaga de datos de transmisión FBMC

A.2.3. GFDM

Se presenta en esta ocasión a la Figura A.11, que contiene una ráfaga de transmisión de datos típica GFDM. Como podemos apreciar, es muy similar a la ráfaga característica de OFDM.

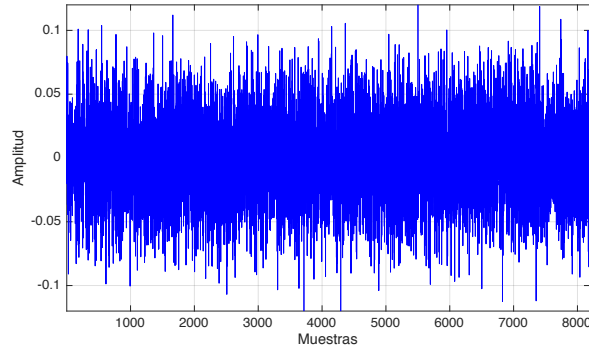


Figura A.11: Ráfaga de datos de transmisión GFDM

A.2.4. UFMC

Por último se presenta la Figura A.12. Contiene una trama de datos característica UFMC. Como se puede apreciar, UFMC posee un formato de transmisión de ráfagas cortas, hecho característico de este tipo de modulación. Cabe destacar que dado que el número de subbandas B está asociado con la longitud del filtro L aplicado, a mayor número de subbandas, mayor será el espaciado entre ráfagas cortas UFMC. Esto se debe a que los filtros, tal y como sucedía en la Figura A.10, precisan de intervalos de transición de inicio y fin.

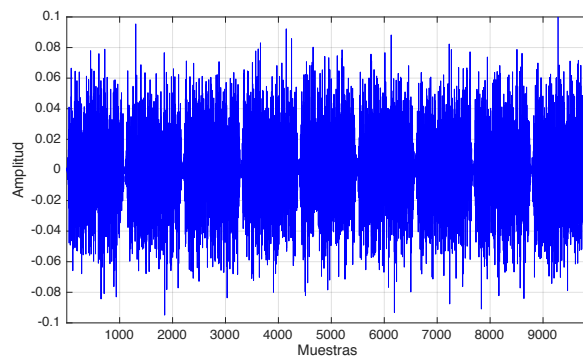


Figura A.12: Ráfaga de datos de transmisión UFMC, formada a su vez por ráfagas cortas

Anexo B

Guía de usuario

APLICACIÓN DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE SEÑALES MULTIPORTADORA ENFOCADAS A REDES 4G Y 5G

En el presente Anexo B se facilita una *Guía de Usuario* básica perteneciente a la Aplicación desarrollada e implementada en este trabajo, cuyo análisis principal se desarrolla en los Capítulos 3 y 4.

Índice general

B.1. Sistema Transmisor	76
B.1.1. Generar una señal	76
B.1.1.1. Elección del tipo de modulación	76
B.1.1.2. Parámetros individuales de modulación	77
B.1.1.3. Parámetros de RF	78
B.1.1.4. Información de la señal generada	78
B.1.2. Exportar señal al <i>Workspace</i> de MATLAB®	78
B.1.3. Visualización	79
B.1.3.1. Tiempo y frecuencia	79
B.1.3.2. Exportar gráfica	79
B.1.4. Transmisión de la señal al VSG	79
B.2. Sistema Receptor	81
B.2.1. Demodular una señal	81
B.2.1.1. Elección de la señal para demodulación	81

B.2.1.2.	Información de la señal transmitida y de la frecuencia de muestreo de la señal capturada	82
B.2.1.3.	Demodulación y visualización	83
B.2.2.	Información de demodulación	83
B.2.2.1.	BER	84
B.2.2.2.	EVM	84
B.2.3.	Guardar señal demodulada	85
B.2.4.	Visualización: constelación y frecuencia	85
B.3.	Sistema Comparador	86
B.3.1.	Número de señales a comparar	86
B.3.2.	Elegir y cargar una señal	86
B.3.3.	Sistema de prioridades	86
B.3.3.1.	Superponer una señal sobre las demás	87
B.3.3.2.	No mostrar una señal	87
B.3.4.	Visualización	88
B.3.4.1.	Constelación	88
B.3.4.2.	Frecuencia	88
B.3.4.3.	Exportar símbolos a MATLAB®	88

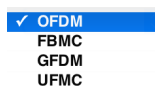
B.1. Sistema Transmisor

En la Interfaz inicial de la Aplicación, el usuario genera un determinado tipo de modulación multiportadora mediante los parámetros individuales de cada una de ellas. Se deberá introducir la frecuencia portadora de RF a la que se desea situar la señal generada en banda base, así como la potencia de salida del generador VSG.

B.1.1. Generar una señal

B.1.1.1. Elección del tipo de modulación

En la sección *Start*, se elegirá una de las siguientes opciones:



donde en el Capítulo 1 de la presente memoria se exponen los significados, propiedades y características de cada uno de los formatos de modulación expuestos.

B.1.1.2. Parámetros individuales de modulación

En la Figura B.1 se muestran los parámetros individuales de cada tipo de modulación que el usuario puede seleccionar.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura B.1: Parámetros iniciales para: (a) OFDM, (b) FBMC, (c) GFDM y (d) UPMC

A continuación se incluyen los valores posibles comunes a todas las modulaciones, en términos de ancho de banda (MHz) e índice de modulación M-QAM, respectivamente, presentes en la sección *Baseband Parameters*:

Bandwidth (MHz)

✓ 5

10

20

Coding Index M-QAM

✓ 4

16

64

así como los valores pertenecientes a cada tipo de modulación:

K

✓ 2

3

4

G

✓ 2

4

8

B

✓ 16

32

64

Correspondiendo con el factor de *Overlapping*, el número de subsímbolos, y el número de subbandas para FBMC, GFDM y UPMC, respectivamente.

Por último destacar los valores de L , longitud del filtro UPMC, y α , su atenuación en frecuencia, para los que el usuario puede introducir cualquier valor entero positivo. Sin embargo, cabe destacar que debido a la implementación matricial realizada en MATLAB[®], la Aplicación buscará en memoria la matriz correspondiente a los parámetros introducidos por el usuario. Si esta existe, la cargará y usará, y sino, la creará. La creación de matrices de

Anexo B

modulación puede requerir grandes espacios de memoria, así como tomar un tiempo de ejecución considerable. Se recomienda por tanto utilizar la Tabla B.1 de valores UPMC.

B	L	α
16	24	40
32	44	40
64	74	40

Tabla B.1: Valores recomendados de L y α en función de B para UPMC

B.1.1.3. Parámetros de RF

Se requerirá que el usuario seleccione tanto la frecuencia portadora como la potencia de salida del VSG. Como valores predefinidos se proponen 1850 MHz y -10 dBm, respectivamente:



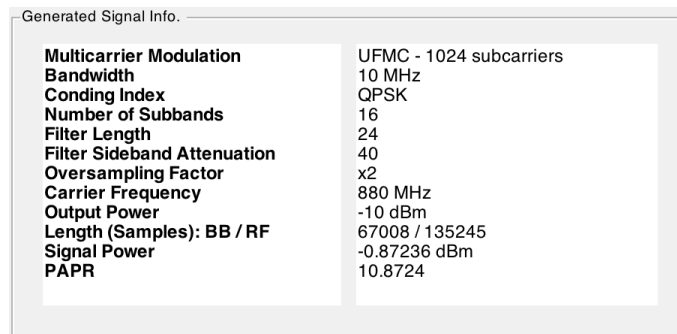
Radio-Frequency Parameters

Carrier Frequency (MHz) 1850

Output Power (dBm) -10

B.1.1.4. Información de la señal generada

Se publicará una tabla informativa en la que se proporcionan todos los datos relevantes respecto a la señal generada, incluyendo el valor de PAPR y sus parámetros tanto en Banda Base (BB) como en RF:



Generated Signal Info.

Multicarrier Modulation	UPMC - 1024 subcarriers
Bandwidth	10 MHz
Coding Index	QPSK
Number of Subbands	16
Filter Length	24
Filter Sideband Attenuation	40
Oversampling Factor	x2
Carrier Frequency	880 MHz
Output Power	-10 dBm
Length (Samples): BB / RF	67008 / 135245
Signal Power	-0.87236 dBm
PAPR	10.8724

B.1.2. Exportar señal al *Workspace* de MATLAB®

Para exportar la estructura de datos que contiene toda la información de la señal generada, incluyendo dicha señal, se deberá seleccionar el *tick* correspondiente en ☒ Save to Workspace. Pese a que se propone un nombre por defecto, el usuario podrá editarlo mediante la selección del *tick* ☒ Edit by-Default Name.

Para generar la señal, el usuario deberá pulsar el botón . Si el *tick* anteriormente citado está seleccionado, se exportará una estructura al espacio actual de trabajo en MATLAB®.

B.1.3. Visualización

B.1.3.1. Tiempo y frecuencia

La Aplicación ofrece dos dominios distintos de visualización: tiempo y frecuencia, mostrados en la sección *Baseband Visualization*. El usuario deberá marcar la opción que desee mediante ☒. No se podrá seleccionar a la vez tiempo y frecuencia, pues se ha implementado exclusión mutua entre ambas representaciones. Las opciones disponibles son, para cada tipo, respectivamente:



para las que corresponde, dada una señal x , $\text{Re}\{x\}$, $\text{Im}\{x\}$, $|x|$ en tiempo, así como el algoritmo FFT implementado en MATLAB® mediante la función « $fft(x)$ » y la aplicación de un enventanado de tipo Welch, normalizado en magnitud a 0 dB con 16.384 puntos.

B.1.3.2. Exportar gráfica

En cualquier momento el usuario puede exportar la gráfica que está siendo mostrada por la Aplicación como archivo *.fig*. Para ello no deberá más que pulsar el botón .

B.1.4. Transmisión de la señal al VSG

Cuando el usuario se haya asegurado de que el montaje experimental es el correcto, así como de que la información mostrada por la Aplicación como parámetros de la señal generada son los correctos, procederá a marcar el *tick* ☒ **VSG Ready**. Posteriormente, se mostrará el botón final de transmisión desde la Aplicación hasta el generador de señales VSG. Para ello, el usuario deberá pulsar el botón .

Se ha decidido desactivar la opción de envío automático de la señal al canal para evitar posibles daños en el *DUT* o en el propio equipo. De esta manera, es el usuario quien decide en que momento activar o desactivar la RF mediante el botón físico correspondiente del VSG.

● La Aplicación utiliza un **sistema de nomenclaturas determinado**. En él, no se permite al usuario modificar el nombre del archivo *.mat* que contiene la señal generada. En dicho nombre figuran los parámetros necesarios para la correcta elección de la señal origen en la Interfaz de Demodulación. No se podrá añadir tampoco ninguna etiqueta posterior al nombre dado por defecto.

Un ejemplo de los formatos de nomenclatura utilizados se presenta a continuación:

■ **OFDM_512_4_10_SENT.mat**

1. Modulación
2. Número de portadoras (relacionado con el ancho de banda)
3. Índice de modulación M-QAM
4. Prefijo cíclico (%)
5. SENT, señal generada para transmitir al generador

■ **FBMC_1024_16_3_SENT.mat**

1. Modulación
2. Número de portadoras (relacionado con el ancho de banda)
3. Índice de modulación M-QAM
4. Factor K de *Overlapping*
5. SENT, señal generada para transmitir al generador

■ **GFDM_2048_64_8_SENT.mat**

1. Modulación
2. Número de portadoras (relacionado con el ancho de banda)
3. Índice de modulación M-QAM
4. Número G de subsímbolos
5. SENT, señal generada para transmitir al generador.

■ **UFMC_1024_16_64_74_SENT.mat**

1. Modulación
2. Número de portadoras (relacionado con el ancho de banda)
3. Índice de modulación M-QAM
4. Número B de subbandas
5. Longitud L del filtro
6. SENT, señal generada para transmitir al generador. Se considera que el parámetro α corresponde siempre con 40 dB.

B.2. Sistema Receptor

Interfaz de la Aplicación basada en la demodulación y representación de las señales capturadas por el DSO. Alterna la visualización de constelación de símbolos demodulados y la respuesta frecuencial de la señal capturada. Además, y en base a lo calculado, muestra los valores de BER y EVM.

B.2.1. Demodular una señal

B.2.1.1. Elección de la señal para demodulación

Para demodular una señal, se deberá elegir primero el archivo origen. La aplicación funciona únicamente para formatos de archivo específicos *.mat*. Por defecto, la aplicación mostrará:

Signal to Demodulate: No signal selected

Si el archivo seleccionado no cumple los requerimientos, se mostrará al usuario un **mensaje de error**. Según el tipo de error, los mensajes pueden ser:

- **Wrong selection. Try a .mat file.** Se ha seleccionado un tipo de archivo cuya extensión no es *.mat*.
- **Wrong .mat selected. Try it again.** Se ha seleccionado un tipo de archivo de extensión *.mat* cuyo contenido no cumple los requisitos esperados por la aplicación. El archivo *.mat* deberá ser una señal capturada con el dispositivo Infinium DSO, presente en el laboratorio de pruebas. Además, deberá incluir la palabra **CAPT** o **SPEC**, tal y como se explica a continuación.

● La Aplicación utiliza un **sistema de nomenclaturas determinado**. Tras capturar la señal, se deberá seguir un formato específico, en el que se sustituirá la palabra **SENT**, presente en la señal generada por la Interfaz del sistema Transmisor, por **CAPT** o **SPEC**, dependiendo del propósito de la captura. Posteriormente se le podrá añadir cualquier etiqueta de texto, sin importar la longitud, pero utilizando caracteres admitidos por MATLAB®.

- **CAPT.** Se desea demodular la señal y obtener sus valores de BER y EVM. Se deberá elegir en el DSO un *span* igual a la frecuencia de muestreo de la señal originalmente transmitida.
- **SPEC.** Se desea visualizar el espectro de la señal, imposibilitando su demodulación y no obteniendo sus valores de BER y EVM. Se deberá elegir en el DSO un *span* superior a la frecuencia de muestreo de la señal originalmente transmitida, siendo 3 veces el valor recomendado.

Anexo B

Un ejemplo de nomenclatura que se deberá llevar a cabo a la hora dar un nombre a la señal capturada por el DSO se presenta a continuación:

- OFDM_512_4_10_SENT.mat → OFDM_512_4_10_ **CAPT**.mat
Alternativamente, se podrá añadir la información posterior que se considere oportuna:
OFDM_512_4_10_CAPT_ **9.7**.mat.
- FBMC_1024_16_3_SENT.mat → FBMC_1024_16_3_ **SPEC**.mat
Alternativamente, se podrá añadir la información posterior que se considere oportuna:
FBMC_1024_16_3_SPEC_ **U3_v2**.mat.
- GFDM_2048_64_8_SENT.mat → GFDM_2048_64_8_ **CAPT**.mat
Alternativamente, se podrá añadir la información posterior que se considere oportuna:
GFDM_2048_64_8_CAPT_ **LFLA10_20KM_-7.1**.mat.
- UPMC_1024_16_64_74_SENT.mat →
UPMC_1024_16_64_74_ **SPEC**.mat
Alternativamente, se podrá añadir la información posterior que se considere oportuna:
UPMC_1024_16_64_74_SPEC_ **LFA_20KM_5.0_N100C**.mat.

B.2.1.2. Información de la señal transmitida y de la frecuencia de muestreo de la señal capturada

Si el formato es el correcto, tras haber elegido el archivo origen, se mostrará en la sección *Selected Signal Info. Preview* información perteneciente a la señal origen transmitida por el generador, según lo mostrado en la Figura B.2.

Selected Signal Info. Preview	
Multicarrier Modulation	GFDM - 2048 subcarriers
Bandwidth	20 MHz
Condng Index	16-QAM
Cyclic Prefix	0 %
Number of Subsymbols	4
Carrier Frequency	880 MHz
Signal Power	-1.2336 dBm
PAPR	11.2336
Generated on	02-Jun-2016

Frequency Sampling Info.	
SENT Frequency Sampling	30720000
CAPT Frequency Sampling	30720000
U Ratio by Default	1

Figura B.2: Sección *Selected Signal Info. Preview* de la interfaz del Sistema Receptor

Será el usuario quien deba asegurarse que existe coincidencia entre la señal que ha capturado y desea demodular y la señal originalmente transmitida. Además, se mostrarán los valores de frecuencia de muestreo de ambas señales, alertando al usuario de valores erróneos que imposibilitarían la correcta demodulación, así como de casos en los que el *span* seleccionado en el DSO sea superior al óptimo.

B.2.1.3. Demodulación y visualización

Una vez el usuario esté conforme con los datos informativos proporcionados por la Aplicación, deberá pulsar, en función del archivo seleccionado inicialmente:

- CAPT.mat:
- SPEC.mat:

Procediendo con la demodulación o la visualización del espectro frecuencial, según el caso.

B.2.2. Información de demodulación

Una vez se ha procedido con la demodulación, la Aplicación mostrará al usuario en qué paso se encuentra. De este modo, cuando cualquier tipo de error dé lugar, el usuario podrá conocer dónde ocurrió, pudiendo así solucionar el problema. Como interfaz inicial, se propone la Figura B.3, en la que observamos la vista cuando no se ha iniciado aún dicho procesado. Los mensajes de alerta, correspondiente a cada etapa son: **Done!**, cuando se ha completado con éxito, **Processing...**, cuando la Aplicación está realizando la operación, y **ERROR**, cuando un error tiene lugar.

The image shows a window titled "Demodulation Info." with a light gray border. Inside, there are two main sections. The top section has two large white rectangular areas, each containing three dots "...". Below these, there are two sub-sections: "BER" on the left and "EVM" on the right. The "BER" section contains two input fields labeled "Value" and "Ratio". The "EVM" section contains two input fields labeled "RMS" and "Peak". All input fields are currently empty.

Figura B.3: Sección *Demodulation Info.* de la interfaz del Sistema Receptor

Las distintas etapas para poder demodular correctamente la señal son, por orden de ejecución:

- **Loading CAPTURED signal.** Se ejecuta la función «load» de MATLAB®, cargandose en la Aplicación la señal que ha sido capturada por el DSO y que se desea demodular.
- **Loading SENT signal.** Se ejecuta la función «load» de MATLAB®, cargandose en la Aplicación la señal que ha sido generada por el VSG y que se servirá de referencia en el proceso de demodulación.
- **RF Demodulation.** Proceso de eliminación del tono con función de *trigger* inicial y posterior correlación cruzada entre la señal capturada y la transmitida de referencia.
- **MCM Demodulation.** Proceso de obtención de los símbolos de datos recibidos y comparación con los enviados.

B.2.2.1. BER

El BER, o *Bit Error Rate*, se obtiene mediante la Ecuación B.1. Se facilita por parte de la Aplicación tanto el valor exacto de la operación resultado de dividir el número de bits erróneos recibidos por el número de bits totales, así como sus valores individuales exactos.

$$BER = \frac{b_{err}}{b_{tot}} \quad (B.1)$$

b_{err} Bits erróneos totales recibidos

b_{tot} Bits totales enviados al canal de comunicaciones

B.2.2.2. EVM

El EVM, o *Error Vector Magnitude*, se obtiene mediante la Ecuación B.2. Se facilita por parte de la Aplicación tanto el valor RMS de la constelación de símbolos demodulados en general, como el valor *Peak*, o máximo, del resultado individual cuyo EVM es más desfavorable.

$$EVM (\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \|y_i - x_i\|^2}{\|y_{\max}\|^2}} \quad (B.2)$$

x_i Símbolos de referencia

y_i Símbolos recibidos

y_{\max} Peor símbolo recibido

N Número total de símbolos demodulados

B.2.3. Guardar señal demodulada

En la sección *save* se posibilita la opción de guardar la señal al fichero actual de trabajo en MATLAB®. Para ello, el usuario deberá seleccionar el botón **Save**. Se propone un nombre de archivo por defecto, en el que las terminaciones CAPT ó SPEC se han sustituido por la terminación **DEMO**. Además, se respeta la etiqueta posterior añadida por el usuario, si la hubiere. Mediante la selección del *tick* ☒ **Edit by-Default Name**, el usuario tiene la posibilidad de modificar dicha información posterior, así como eliminarla por completo.

B.2.4. Visualización: constelación y frecuencia

Uno de los elementos más importantes de la interfaz de este Sistema Receptor de la Aplicación es su capacidad de representación. En ella se ofrece la alternancia entre la constelación de símbolos tanto demodulados, en **rojo**, como enviados, en **azul**, así como de la representación de la señal en frecuencia. Se deberá seleccionar el ☒ para cada caso, no pudiéndose seleccionar ambos simultáneamente. Respecto a los formatos de visualización, se podrán seleccionar, para la constelación o el espectro, cualquiera de las siguientes opciones:



En este caso de representación en frecuencia, la nueva opción «Tx-Rx Comparison» corresponde con la visualización simultánea del espectro transmitido y el recibido, pudiéndose apreciar, de este modo, las posibles distorsiones producidas por el canal, así como el nivel de ruido del sistema. Se propone la Figura B.4 como ejemplo de los 3 tipos de visualizaciones frecuenciales disponibles en la Aplicación.

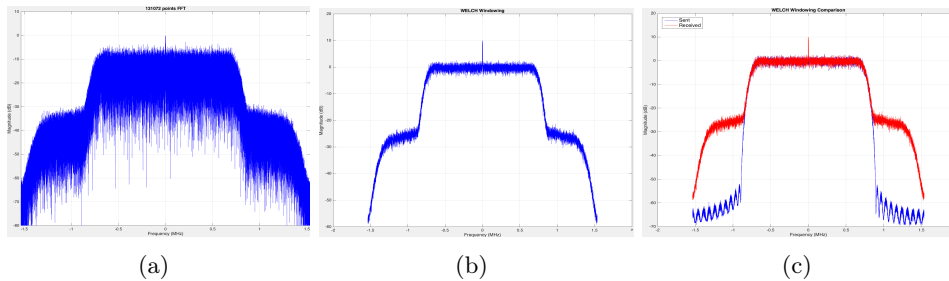


Figura B.4: Visualización frecuencial: (a) FFT Algorithm, (b) WELCH Windowing, y (c) Tx-Rx Comparison

B.3. Sistema Comparador

Interfaz de la Aplicación basada en la comparación de distintas señales demoduladas. Permite realizar una comparativa tanto a nivel de constelación como a nivel de respuesta frecuencial.

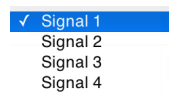
B.3.1. Número de señales a comparar

El elemento principal sobre el que se basa el presente Sistema es el número de señales que se desea comparar. Por ello, lo primero que se debe hacer para poder utilizar dicha vista de la interfaz es acudir a la sección *Baseband Visualization Comparison*, y una vez en ella, seleccionar el número de señales a comparar en *Number to Compare*. Dicho valor será 2, 3 ó 4. Por defecto, el número predefinido será de 2 señales.

- La Aplicación utiliza un **sistema de nomenclaturas determinado**. Tras demodular y guardar la señal, esta poseerá el formato tipo **DEMO.mat**. Posteriormente se le podrá añadir cualquier etiqueta de texto, sin importar la longitud, pero utilizando caracteres admitidos por MATLAB®.

B.3.2. Elegir y cargar una señal

Para utilizar o cargar una señal, deberá seleccionarse desde archivo. Se facilita para ello una lista que contiene los archivos actuales presentes en el espacio actual de trabajo de MATLAB®, similar al presentado en la interfaz del Sistema Receptor. En función del número de señales escogido, se deberá seleccionar una a una:





Cada una de las señales posee un color determinado, correspondiendo el **azul** para la **Señal 1**, el **rojo** para la **Señal 2**, el **verde** **Señal 3**, y finalmente el **negro** para la **Señal 4**.

B.3.3. Sistema de prioridades





Una vez la señal se ha elegido y cargado correctamente, se presentará su información relativa, tal y como se muestra a continuación el ejemplo para la **Señal 1**:

Signal 1

 Name: FBMC_2048_16_4_DEMO_LFLA_20KM_14.0.mat 

Multicarrier Modulation	FBMC - 2048 subchannels
Bandwidth	20 MHz
Coding Index	16-QAM
Generated on	02-Jun-2016
BER	0
EVM	3.2755%

B.3.3.1. Superponer una señal sobre las demás

Una vez la señal ha sido cargada, podemos observar claramente como figuran dos símbolos distintos:  y . El primero de ellos, , corresponde con el denominado «Sistema de prioridades», y nos permite tanto seleccionar que esa señal va a ser incluida desde la lista de archivos disponibles (nuevamente y sobrescribiendo los datos o por primera vez) o mostrarla primero y sobre las demás. Esto supone que, pase lo que pase, la señal cuyo  se haya seleccionado se verá sobre todas las demás. Como ejemplo de aplicación se propone la Figura B.5, en la que, para 3 señales distintas, se ha decidido superponer a la **Señal 2** sobre todas las demás.

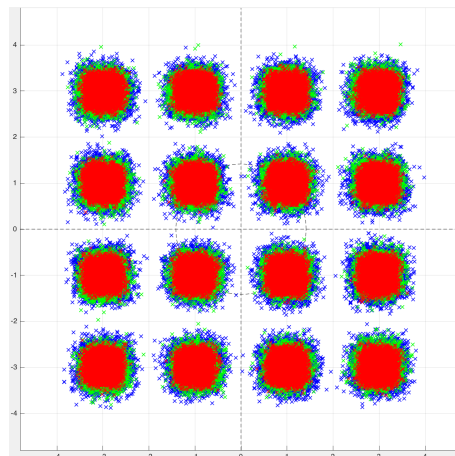



Figura B.5: Señal 2 superpuesta a la Señal 3, superpuesta a su vez a la Señal 1

B.3.3.2. No mostrar una señal

Fácilmente puede darse el caso de no desear mostrar los resultados de una señal determinada. Con este objetivo se deberá des-seleccionar el  correspondiente de dicha señal. Esto provocará que sus resultados desaparezcan de la visualización, respetándose siempre el orden de prioridad previamente impuesto.

B.3.4. Visualización


La visualización ofrecida por la Aplicación para este Sistema Comparador es similar a la ya presentada anteriormente en el Sistema Receptor. Se ofrecen dos modos distintos de representación: constelación y frecuencia. Las opciones disponibles para cada caso son respectivamente:



B.3.4.1. Constelación

Dado que se permite comparar señales con distinto índice M-QAM, distinto ancho de banda, o distinta modulación multiportadora, se proponen distintas opciones de visualización de constelación. Cuando se comparen señales de distinto índice M-QAM, la opción «Optimum» corresponderá con el índice más elevado. De esta manera se asegura la correcta visualización de todos y cada uno de los símbolos. El resto de opciones corresponden con el número de símbolos a visualizar.

B.3.4.2. Frecuencia

En este caso, las opciones disponibles son 3. La opción «Individual» corresponde con el visionado en frecuencia de la señal cuya prioridad sea la principal y esté seleccionado el símbolo .

B.3.4.3. Exportar símbolos a MATLAB®

Con el objetivo de disponer de los símbolos de datos disponibles en el espacio actual de trabajo, se permiten exportar fácilmente mediante la selección del *tick* en ☒ Export Data to Current Folder. El usuario podrá libremente modificar el nombre del archivo *.mat*, debiendo pulsar el botón una vez su elección sea definitiva.

Anexo C

Configuraciones básicas

En el presente Anexo C se incluyen una serie de apartados en los que se indican qué elementos son necesarios y cómo han de ser configurados para el correcto uso de la Aplicación presentada en el Capítulo 3.

Índice general

C.1. Configuración software: VSA	89
C.2. Configuración hardware	92

C.1. Configuración software: VSA

Una vez se ha generado la señal multiportadora cuyo estudio quiere realizarse, es necesario configurar el VSA. Como se ha especificado previamente, tras la transmisión de la señal desde el ESG VSG y su correspondiente paso por el DUT, ésta debe ser capturada. Para ello, configuraremos los parámetros correspondientes a la aplicación.

En el dispositivo Infiniium DSO:

1. **Input** ▷ **Channels** ▷ **Baseband: 1 Channel** ▷ **2 Channel**

2. **Input** ▷ **Trigger...** (ver Figura C.1)

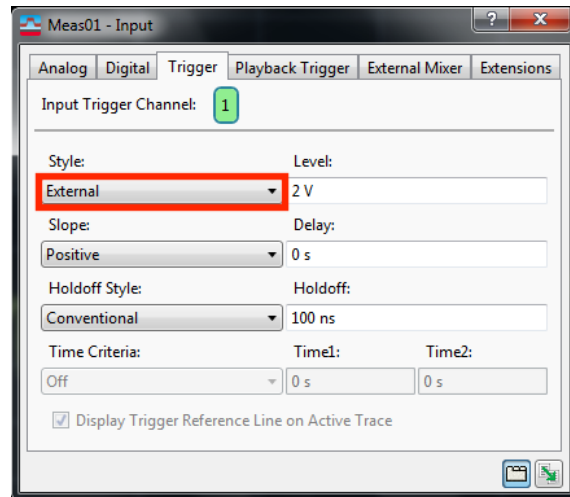


Figura C.1: Configuración del trigger externo via AUX TRIG.

3. **Input** ▷ **Recording...** (ver Figura C.2)

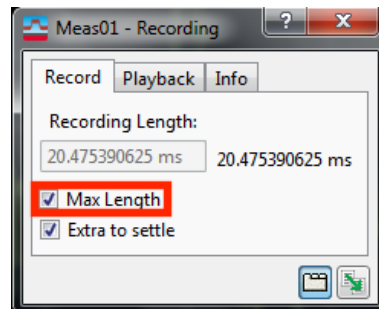


Figura C.2: Configuración del tiempo de captura.

4. Click izquierdo ▷ **Rango / Frecuencia central / Span** (ver Figura C.3)

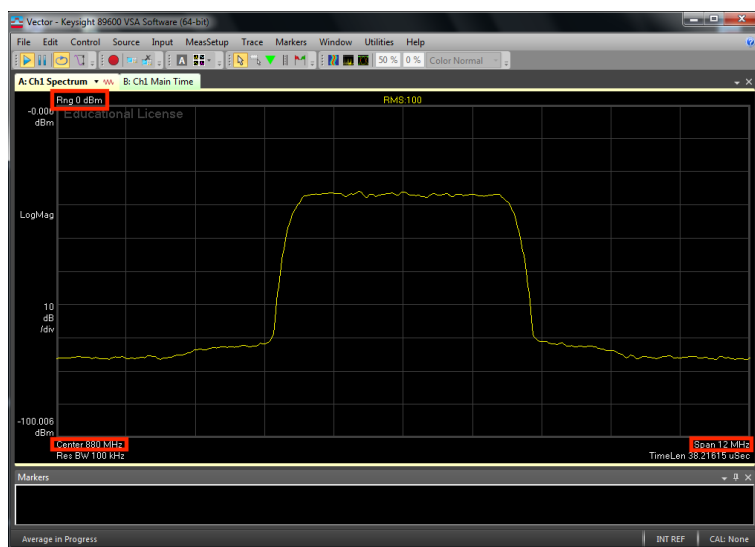


Figura C.3: Configuración del rango, frecuencia central y span.

5. **Input** ▷ **Extensions...** (ver Figura C.4)

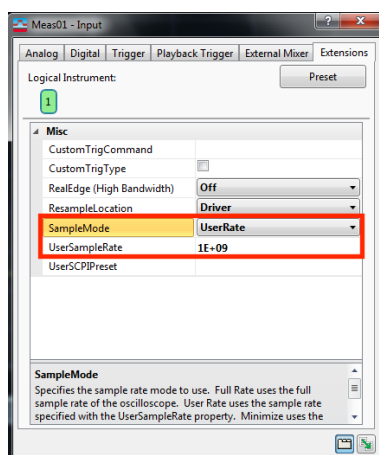


Figura C.4: Configuración de la tasa de muestreo.

6. ● Capture

7. File ▷ Save recording... → : \\ highfrequency \ TFG_LUIS

C.2. Configuración hardware

Es necesario establecer qué relaciones existen entre los elementos hardware que permiten el correcto funcionamiento del sistema global en el que la aplicación se ejecutará. Con este fin se incluye un esquema general en el que se presenta tal información necesaria, presente en la Figura C.5.

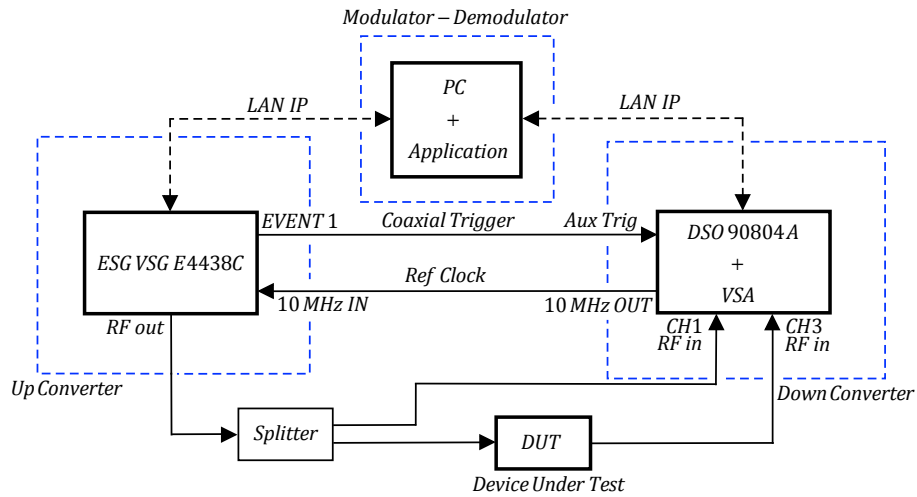


Figura C.5: Esquema del sistema Transmisor-Receptor

Como elementos principales destacamos:

- **Ref Clock**, o reloj de referencia del sistema. Es el DSO quien envía la referencia de 10 MHz al ESG.
- **Coaxial Trigger**. El ESG envía la señal que servirá como indicador de inicio del tiempo de captura al DSO.
- **LAN IP**. Conexión mediante cable Ethernet que posibilitará la comunicación bi-direccional entre la Aplicación y los dispositivos ESG y DSO.

Anexo D

Montajes Experimentales

En el presente Anexo D se incluyen los montajes experimentales necesarios para el desarrollo del presente TFG. En el Anexo G se incluyen las hojas de especificaciones de los componentes utilizados: amplificadores, láser y foto-detector óptico.

D.1. Amplificador de Potencia

En la Figura D.1 aparece el montaje necesario para la consecución de la toma de medidas experimentales correspondientes con la caracterización de un PA, o amplificador de potencia.

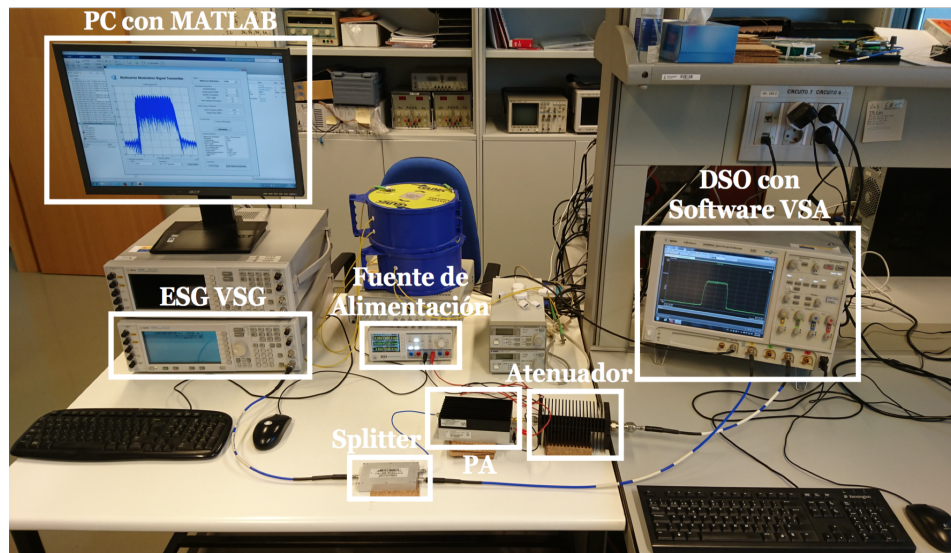


Figura D.1: Montaje experimental para la caracterización de un amplificador de potencia

Como elementos necesarios, se presentan el PC que ejecuta la Aplicación presentada en el Capítulo 3, el generador de señales ESG, el «splitter» necesario para la constante monitorización de potencia de salida del generador, el amplificador alimentado mediante la fuente de alimentación, el atenuador de protección y, finalmente, el osciloscopio DSO que implementa el software de VSA.

D.2. Fibra Óptica

La Figura D.2 presenta el montaje necesario para la correcta de la toma de medidas experimentales correspondientes con la caracterización de la fibra óptica.

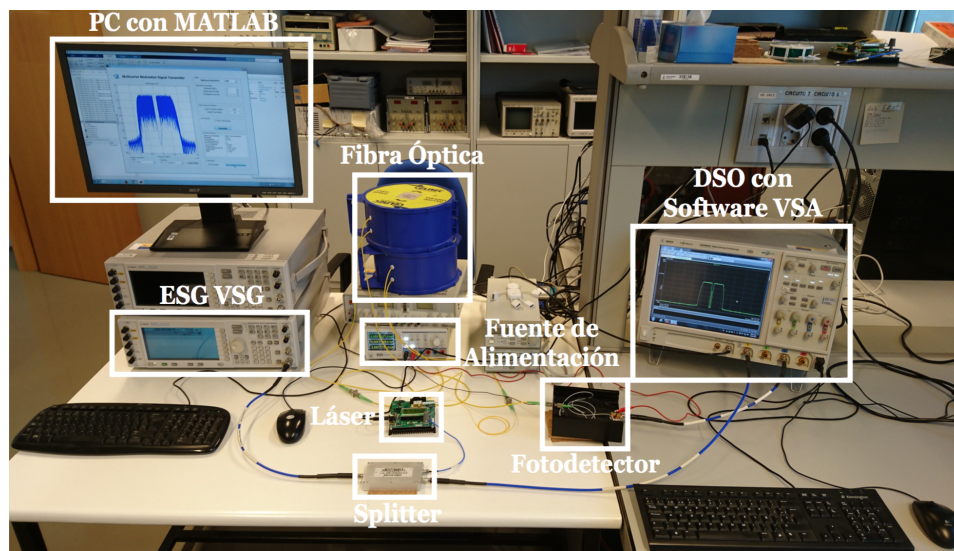


Figura D.2: Montaje experimental para la caracterización de fibra óptica

En esta ocasión, además del PC, el ESG, el «splitter» y el DSO, se presenta el diodo láser, el fotodetector alimentado mediante la correspondiente fuente de alimentación y, finalmente, los dos carretes de fibra de 10 km cada uno.

D.3. Radio sobre Fibra

A continuación se incluye la Figura D.3, formada por superposición de ambas Figuras D.1 y D.2 previas.

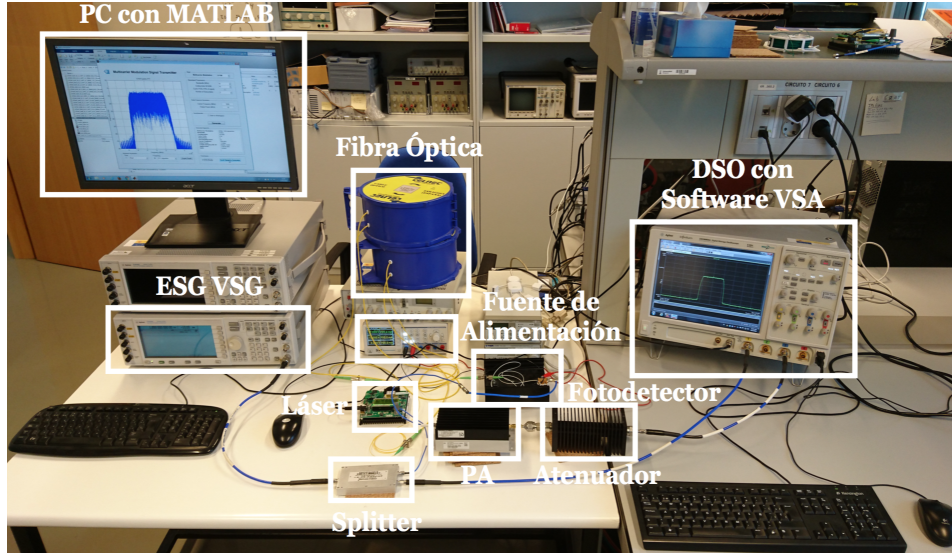


Figura D.3: Montaje experimental para la caracterización de sistema completo de Radio sobre Fibra

D.4. Consumo energético

Finalmente se proporciona la Figura D.4 que contiene el montaje necesario para la realización del estudio correspondiente con el consumo energético.

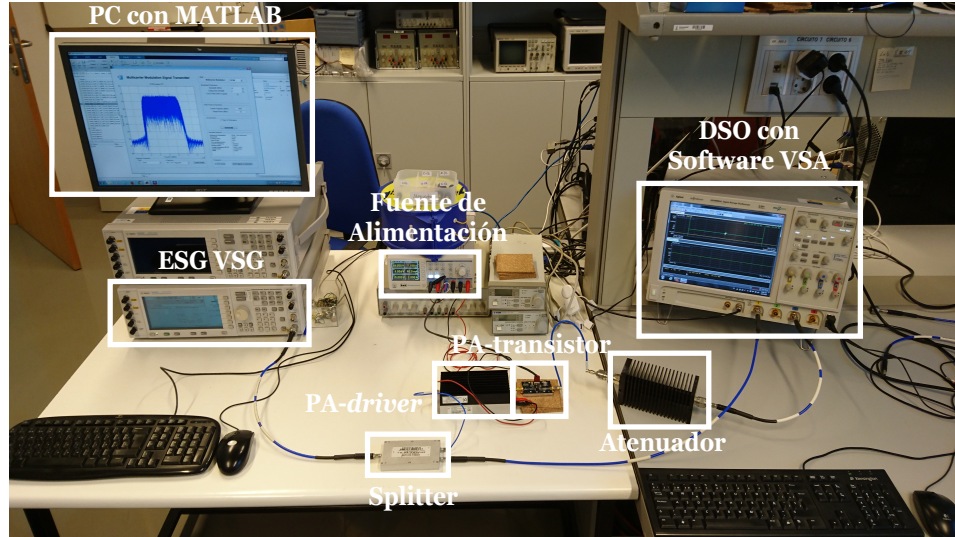


Figura D.4: Montaje experimental para la caracterización de sistema completo de Radio sobre Fibra

En esta ocasión, destaca como elemento extra el amplificador de potencia formado por un único transistor HEMT, base del estudio.

Anexo E

Resultados

En el presente Anexo E se incluyen todas las medidas experimentales realizadas en este TFG en formato Tabla, si han sido incluidas como Figuras en el cuerpo de la Memoria, o formato Figura-Tabla para aquellas que no lo hayan sido.

E.1. Medidas con Amplificador de Potencia

P_{in} (dBm)	EVM (%)			
	OFDM —	FBMC K = 4	GFDM G = 4	UFMC B = 16
-30,0500	1,7964	1,6248	2,0312	2,5950
-27,8730	1,6556	2,1702	2,0012	2,5669
-26,0040	1,6066	2,4046	3,7976	2,8533
-23,9920	2,2290	2,2239	2,6055	1,6412
-22,0250	4,0980	2,478	4,5705	3,1177
-19,9260	4,4570	3,7733	8,0616	3,6465
-18,0750	7,6305	6,9273	12,1536	6,9715
-16,1310	12,1099	12,1521	15,2021	12,3049
-13,9670	17,7087	16,7346	19,5000	18,1428
-12,9700	20,3693	19,9793	23,1053	21,2221
-12,1140	22,9610	22,2173	25,5212	23,4745
-11,2420	25,1124	24,6779	27,2107	26,0786

Tabla E.1: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para los cuatro formatos de modulación, con 10 MHz de ancho de banda y 16-QAM

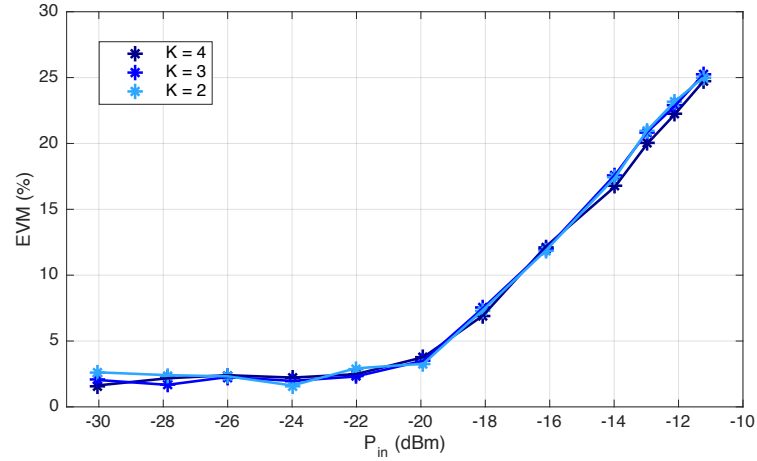


Figura E.1: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para FBMC/16-QAM, con K factor de *Overlapping*

P_{in} (dBm)	EVM (%)		
	K = 2	K = 3	K = 4
-30,0500	2,6271	2,0459	1,6248
-27,8730	2,4078	1,6732	2,1702
-26,0040	2,3214	2,2659	2,4046
-23,9920	1,6227	1,9722	2,2239
-22,0250	2,9256	2,3050	2,478
-19,9260	3,2732	3,5078	3,7733
-18,0750	7,3535	7,4926	6,9273
-16,1310	11,8504	11,9349	12,1521
-13,9670	17,4363	17,6349	16,7346
-12,9700	21,0010	20,8688	19,9793
-12,1140	23,1874	22,8496	22,2173
-11,2420	24,989	25,1933	24,6779

Tabla E.2: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para FBMC/16-QAM, con K factor de *Overlapping*

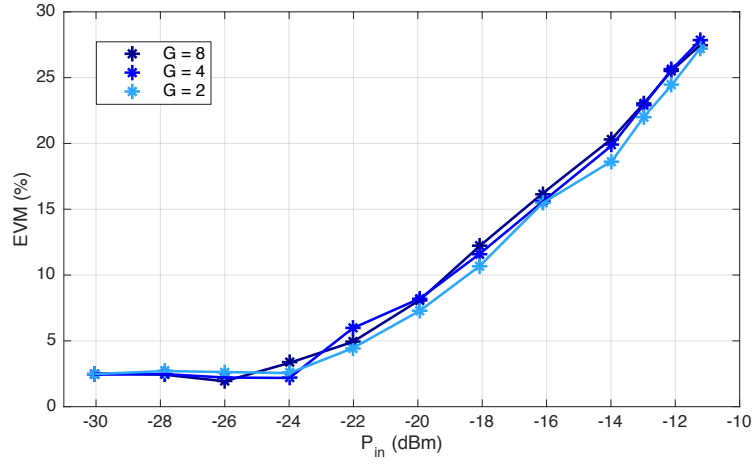


Figura E.2: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para GFDM/16-QAM, con G número de subsímbolos

P_{in} (dBm)	EVM (%)		
	G = 2	G = 4	G = 8
-30,0500	2,4765	2,4337	2,5321
-27,8730	2,7056	2,4731	2,4302
-26,0040	2,6323	2,2143	1,9288
-23,9920	2,5519	2,1810	3,3250
-22,0250	4,4414	5,9565	4,9175
-19,9260	7,3072	8,2308	8,1252
-18,0750	10,6986	11,6204	12,2137
-16,1310	15,4551	15,5535	16,1860
-13,9670	18,6671	19,8573	20,3656
-12,9700	22,0343	22,9615	23,0588
-12,1140	24,4315	25,6105	25,5230
-11,2420	27,1808	27,8006	27,4335

Tabla E.3: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para GFDM/16-QAM, con G número de subsímbolos

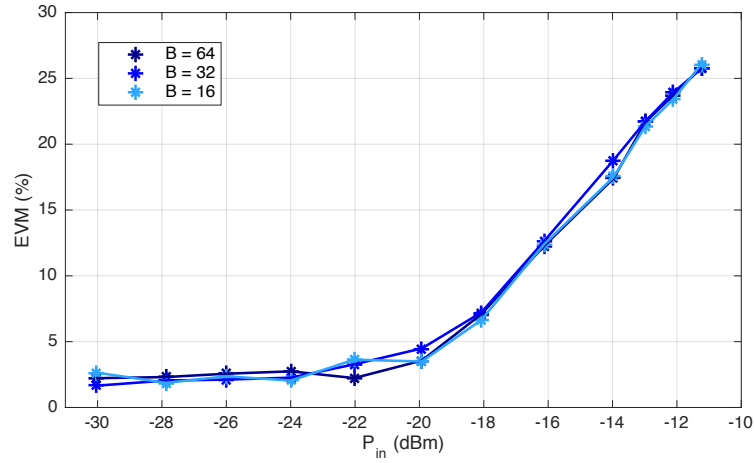


Figura E.3: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para UPMC/16-QAM, con B número de subbandas y L longitud del filtro, para $\alpha = 40$ dB

P_{in} (dBm)	EVM (%)		
	B = 16 L = 24	B = 32 L = 44	B = 64 L = 74
-30,0500	2,6574	1,6515	2,2231
-27,8730	1,8701	2,0465	2,3102
-26,0040	2,3672	2,1171	2,5643
-23,9920	2,0446	2,2632	2,7447
-22,0250	3,6350	3,2773	2,2319
-19,9260	3,4912	4,4837	3,5631
-18,0750	6,6521	7,2229	7,0895
-16,1310	12,3807	12,6197	12,2597
-13,9670	17,5105	18,7923	17,4030
-12,9700	21,3844	21,7614	21,7060
-12,1140	23,4020	23,9289	23,7178
-11,2420	26,0786	25,7432	25,823

Tabla E.4: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para UPMC/16-QAM, con B número de subbandas y L longitud del filtro, para $\alpha = 40$ dB

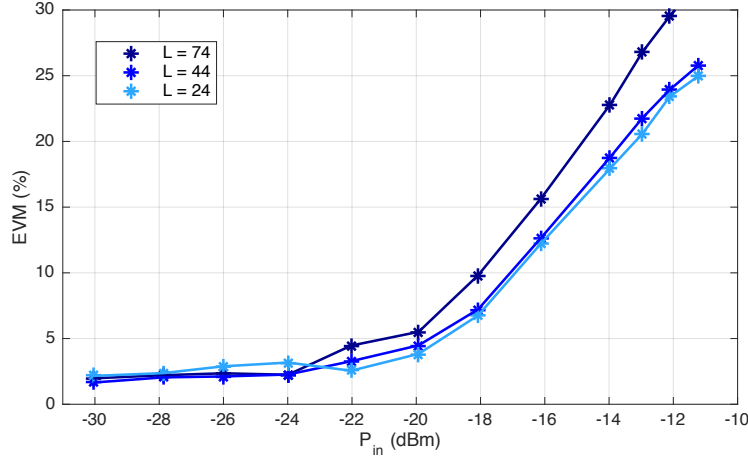


Figura E.4: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para UFMC/16-QAM, con B número fijo de 32 subbandas y L longitud del filtro variable, para $\alpha = 40$ dB

P_{in} (dBm)	EVM (%) B = 32		
	L = 24	L = 44	L = 74
-30,0500	2,1565	1,6515	1,9707
-27,8730	2,3708	2,0465	2,2132
-26,0040	2,8879	2,1171	2,3565
-23,9920	3,1743	2,2632	2,2446
-22,0250	2,5517	3,2773	4,4648
-19,9260	3,8361	4,4837	5,5125
-18,0750	6,7623	7,2229	9,817
-16,1310	12,2002	12,6197	15,6167
-13,9670	17,9409	18,7923	22,8056
-12,9700	20,5586	21,7614	26,7731
-12,1140	23,3990	23,9289	29,5268
-11,2420	24,9416	25,7432	31,9311

Tabla E.5: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para UFMC/16-QAM, con B número fijo de 32 subbandas y L longitud del filtro variable, para $\alpha = 40$ dB

E.2. Medidas con Radio sobre Fibra

P_{in} (dBm)	EVM (%)			
	OFDM —	FBMC K = 4	GFDM G = 4	UFMC B = 16
-0,8000	14,2395	14,0162	14,2525	13,7723
-4,6200	7,5589	8,5376	9,4535	8,9885
-8,7400	4,503	4,2718	5,9867	4,2341
-12,8000	3,1205	2,8857	3,5378	3,6385
-16,8400	3,0923	2,6121	3,2668	3,6541
-21,0000	3,7923	4,2975	4,1197	4,2599
-24,8000	5,5941	5,3443	6,7478	6,4897
-28,8800	7,9254	7,8660	7,9813	8,4318
-34,2000	12,2765	13,7539	14,7994	15,3663
-37,0000	19,1897	19,5005	19,2458	20,3209
-41,4400	30,6776	32,0112	34,8432	32,9439

Tabla E.6: Valores de EVM (%) en función de P_{in} , con 10 km de fibra óptica, con 10 MHz de ancho de banda y 16-QAM

P_{in} (dBm)	EVM (%)			
	OFDM —	FBMC K = 4	GFDM G = 4	UFMC B = 16
-0,8000	9,2288	10,0149	10,8907	9,2253
-4,6200	4,3878	4,6906	6,5039	5,4172
-8,7400	3,01	3,2744	3,8445	3,8469
-12,8000	3,8219	3,4095	3,5172	3,7168
-16,8400	5,9221	6,8806	5,1943	6,3125
-21,0000	9,596	8,7935	8,342	8,2662
-24,8000	14,0754	12,088	13,9595	12,7708
-28,8800	21,9	19,416	20,12	20,0618
-34,2000	34,4588	35,1247	36,4211	32,1806

Tabla E.7: Valores de EVM (%) en función de P_{in} , con 20 km de fibra óptica, con 10 MHz de ancho de banda y 16-QAM

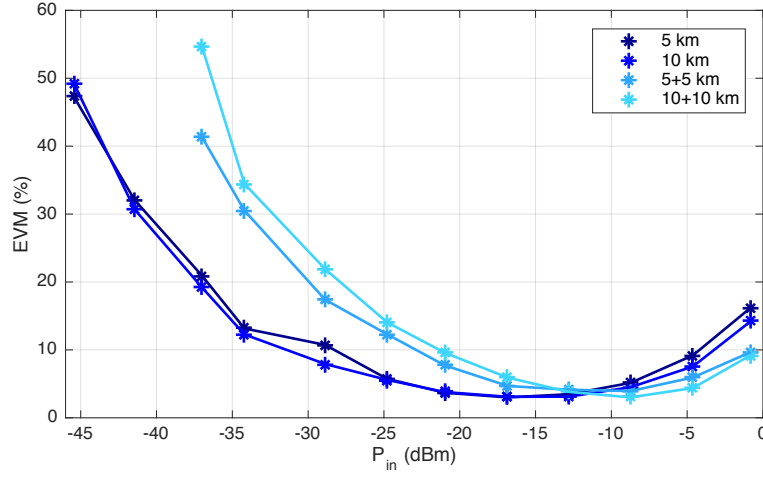


Figura E.5: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para OFDM, con longitudes de 5, 10 y 20 km, con el uso de 1, 1, 2 y 2 carretes de fibra en serie respectivamente, para 10 MHz de ancho de banda y 16-QAM

P_{in} (dBm)	EVM (%) OFDM			
	5 km	10 km	5+5 km	10+10 km
-0,8000	16,2297	14,2395	9,6857	9,2288
-4,6200	9,1974	7,5589	5,9407	4,3878
-8,7400	5,1412	4,503	3,9377	3,01
-12,8000	3,4660	3,1205	4,1288	3,8219
-16,8400	3,0066	3,0923	4,6972	5,9221
-21,0000	3,7030	3,7923	7,7324	9,596
-24,8000	5,7518	5,5941	12,3185	14,0754
-28,8800	10,7377	7,9254	17,3992	21,9
-34,2000	13,1600	12,2765	30,5179	34,4588
-37,0000	20,9246	19,1897	41,3331	54,6287
-41,4400	32,0596	30,6776	-	-
-45,4500	47,2729	49,2346	-	-

Tabla E.8: Valores de EVM (%) en función de P_{in} para OFDM, con longitudes de 5, 10, 5+5=10 y 10+10=20 km, con el uso de 1, 1, 2 y 2 carretes de fibra en serie respectivamente, para 10 MHz de ancho de banda y 16-QAM

E.3. Medidas con sistema completo

P_{out} (dBm)	EVM (%)			
	OFDM —	FBMC K = 4	GFDM G = 4	UFMC B = 16
-16,85	4,2017	2,67	3,1862	2,9323
-12,8	4,5118	3,25	4,7366	2,497
-11,22	4,5244	4,1353	4,7887	3,9581
-8,8	6,3928	6,4594	7,9458	4,5639
-7,7	8,193	8,192	9,1472	5,0992
-5,6	10,6013	9,1255	9,9933	5,0602
-4,5	11,4044	12,48	11,0492	7,8273

Tabla E.9: Valores obtenidos de EVM (%) en función de la potencia de salida P_{out} del DUT, para 20 MHz de ancho de banda y 16-QAM

Anexo F

Códigos de MATLAB®

En el presente Anexo F se incluyen los códigos MATLAB® de los programas necesarios para el desarrollo del presente TFG:

- Programas de generación de modulaciones multiportadora
- Programas de generación de los parámetros y matrices necesarios para la correcta implementación de las modulaciones multiportadora
- Los funciones aparecen en el orden presentado a continuación:
 1. mod_ofdm.m
 2. mod_fbmc.m
 3. mod_gfdm.m
 4. mod_ufmc.m
 5. filterFBMC.m
 6. matrix_gfdm.m
 7. matrix_ufmc.m

```
function [BB,C] = mod_ofdm(PRBS,N,M,CP)
%MOD_OFDM Funcion que genera una señal de tipo CP-OFDM M-QAM (4G)
% Parametros de ENTRADA:
% - PRBS: datos iniciales, en bits
% - N: nº de subportadoras
% - M: indice M-QAM
% - CP: codigo ciclico, en % de la señal
% Parametros de SALIDA:
% - BB: señal modulada en Banda Base
% - C: nº de columnas de la matriz de datos

% Datos iniciales
prbs = PRBS;
in = double(ltePRBS(prbs,prbs));
k = log2(M);
C = prbs/(N*k); % Columnas en la matriz FFT

% Trunking: mejores resultados que ZP -> Todas las demas modulaciones
if mod(C,2) ~= 0
    in = in(1:N*k*floor(C));
    C = floor(C);
end

% Binario -> simbolo
u = reshape(in,length(in)/k,k);
r = bi2de(u); % Right-to-left side

% Modulacion QAM
s = qammod(r,M);

% S2P
d = reshape(s,N,C);

% Anulamos algunas portadoras
% d(end/2+pnul,:) = 0;

% CP: 10% de la señal
cpl = floor(CP*0.01 * N); % CP = 0.1

% cpl = 0;
cps = N-cpl;

% iFFT: implementacion lineal (L)
% v = ifft(d);

% IFFT: implementacion matricial (M)
DFT = conj(dftmtx(N))/N;
v = DFT*d;

% Insercion del codigo ciclico en las subportadoras
for i=1:C,
    if cpl > 0
        for j=1:cpl,
            cp(j,i) = v(j+cps,i); % FFT Circular
        end
        vv(:,i) = vertcat(cp(:,i), v(:,i));
    else % No CP
        vv = v;
    end
end

% P2S
[fi_cp,co_cp] = size(vv);
len = fi_cp*co_cp;

% Señal OFDM a transmitir, en Banda Base
BB = reshape(vv, 1, len);
end
```

```

function [BB,C] = mod_fbmc(PRBS,N,M,K)
%MOD_FBMC Funcion que genera una señal de tipo FBMC/O-QAM M-QAM (5G)
% Parametros de ENTRADA:
%   - PRBS: datos iniciales, en bits
%   - N: nº de subportadoras
%   - M: indice M-QAM
%   - K: factor de Overlapping
% Parametros de SALIDA:
%   - BB: señal modulada en Banda Base
%   - C: nº de columnas de la matriz de datos

prbs = PRBS;
in = double(ltePRBS(prbs,prbs));
k = log2(M);
ndx = log2(M);
C = prbs/(N*ndx); % Columnas en la matriz FFT

% Trunking: better performance -> Todas las demas modulaciones
if mod(C,2) ~= 0
    in = in(1:N*ndx*floor(C));
    C = floor(C);
end

% Binary to symbol
u = reshape(in,length(in)/ndx,ndx);
r = bi2de(u); % Right-to-left side

% Modulation QAM
l = qammod(r,M,0);

% S2P
d = reshape(l,N/2,2*C);

% Prototype Filter (cf M. Bellanger, Phydys project)
h = filterFBMC(N,K);

x = zeros(1,K*N+(2*C-1)*N/2); % Señal a transmitir
s = zeros(N,2*C);

for ind=1:2*C

% O-QAM: distribuimos los simbolos en real-imag -> Menor tasa efectiva (/2)
if rem(ind,2) == 1 % Columnas impares
    s(1:2:N,ind) = real(d(:,ind)); % Filas impares
    s(2:2:N,ind) = 1i.*imag(d(:,ind)); % Filas pares
else % Columnas pares
    s(1:2:N,ind) = 1i.*imag(d(:,ind));
    s(2:2:N,ind) = real(d(:,ind));
end

% iFFT
v = ifft(s(:,ind));

% PPN parte 1: retraso de la senal N muestras, K-1 veces
vv = v.';
for ndx = 1:K-1
    vv = horzcat(vv,v.');
end

% PPN parte 2: filtrado por filtro prototipo
signal = vv.*h;

% PPN parte 3: suma en P2S
x(1+(ind-1)*N/2:(ind-1)*N/2+K*N) = x(1+(ind-1)*N/2:(ind-1)*N/2+K*N) + signal;

end

% Señal FBMC a transmitir, en Banda Base
BB = x;
end

```

```
function [BB,C,CC] = mod_gfdm(PRBS,N,M,CP,G)
%MOD_GFDM Funcion que genera una señal de tipo GFDM/O-QAM M-QAM (5G)
% Parametros de ENTRADA:
% - PRBS: datos iniciales, en bits
% - N: n de subportadoras
% - M: indice M-QAM
% - CP: codigo ciclico, en % de la señal
% - G: n de subsimbolos
% Parametros de SALIDA:
% - BB: señal modulada en Banda Base
% - C: n de columnas de la matriz de datos
% - CC: n de columnas de la matriz de datos, multiplo de G

% Datos iniciales
prbs = PRBS;
in = double(ltePRBS(prbs,prbs));
K = G; % Numero de subsimbolos
ndx = log2(M);
C = prbs/(N*ndx); % Columnas en la matriz FFT

% Trunking: better performance -> Todas las demas modulaciones
if mod(C,2) ~= 0
    in = in(1:N*ndx*floor(C));
    C = floor(C);
end

% Binary to symbol
u = reshape(in,length(in)/ndx,ndx);
r = bi2de(u); % Right-to-left side

% Modulacion QAM
l = qammod(r,M,0);
d = reshape(l,N,length(l)/N);

% C ha de ser multiplo de K: numero de subsimbolos GFDM
% Atencion: hay dos C distintas para cada paso distinto
CC = floor(length(l)/N/K);

% d(:,1:K:end) = 0; % Anulamos primer subsimbolo
% Anulamos determinadas portadoras
% d(1:100,:) = 0;
% d(1:50,:) = 0;
% d(end/2:end/2+50,:) = 0;

% P2S
v = reshape(d(1:N*K*CC),N*K,CC);

% O-QAM
vi = real(v);
vq = imag(v);

% Cargamos las matrices de modulacion desde archivo,
% segun: "GFDM: Analysis of an alternative MCT for next generation"
load(['AAi_' num2str(N) '_' num2str(G) '.mat']);
load(['AAq_' num2str(N) '_' num2str(G) '.mat']);

xx = zeros(N*K,CC);

for cc = 1:CC
    xx(:,cc) = AAi*vi(:,cc)+AAq*vq(:,cc);
end

x = reshape(xx,[1 N*K*CC]);

% Señal GFDM a transmitir, en Banda Base
BB = x;
end
```

```
function [BB,C] = mod_ufmc(PRBS,N,M,B,L,a)
%MOD UFMC Funcion que genera una señal de tipo UFMC M-QAM (5G)
% Parametros de ENTRADA:
%   - PRBS: datos iniciales, en bits
%   - N: nº de subportadoras
%   - M: indice M-QAM
%   - B: nº de subbandas
%   - L: longitud del filtro aplicado a nivel de subbanda
%   - a: atenuacion del lobulo secundario respecto del primario
% Parametros de SALIDA:
%   - BB: señal modulada en Banda Base
%   - C: nº de columnas de la matriz de datos

% Datos iniciales
prbs = PRBS;
in = double(ltePRBS(prbs,prbs));
k = log2(M);
C = prbs/(N*k); % Columnas en la matriz FFT

% Trunking: better performance -> Todas las demas modulaciones
if mod(C,2) ~= 0
    in = in(1:N*k*floor(C));
    C = floor(C);
end

% Binary to symbol
u = reshape(in,length(in)/k,k);
r = bi2de(u); % Right-to-left side

% Modulation QAM
s = gammod(r,M);

% S2P
d = reshape(s,N,C);

% Cargamos la matriz de modulacion A
load(['A_' num2str(N) '_' num2str(B) '_' num2str(L) '_' num2str(a) '.mat']);

w = zeros(FFTsize + lFIR - 1,C);

w = A*d;

x = reshape(w,[1 (FFTsize + lFIR - 1)*C]);

% Señal UFMC a transmitir, en Banda Base
BB = x;
end
```

```

function [h] = filterFBMC(N,K)
%FILTERFBMC Funcion que genera el filtro prototipo para FBMC (5G)
%   Parametros de ENTRADA:
%       - N: nº de subportadoras
%       - K: factor de Overlapping
%   Parametros de SALIDA:
%       - h: coeficientes del filtro prototipo

% Prototype Filter (cf M. Bellanger, Phydys project)
K4 = [1 0.971960 sqrt(2)/2 0.235147]; % K = 4
K3 = [1 0.911438 0.411438]; % K = 3
K2 = [1 sqrt(2)/2]; % K = 2

factech4 = 1 + 2*(K4(2)+K4(3)+K4(4)); % K = 4
hef4(1:4*N) = 0;
factech3 = 1 + 2*(K3(2)+K3(3)); % K = 3
hef3(1:3*N) = 0;
factech2 = 1 + 2*(K2(2)); % K = 2
hef2(1:2*N) = 0;

for i = 1:4*N-1
    hef4(1+i) = 1 - 2*K4(2)*cos(pi*i/(2*N)) + ...
        2*K4(3)*cos(pi*i/N) - 2*K4(4)*cos(pi*i*3/(2*N));
    hef3(1+i) = 1 - 2*K3(2)*cos(pi*i/(2*N)) + ...
        2*K3(3)*cos(pi*i/N);
    hef2(1+i) = 1 - 2*K2(2)*cos(pi*i/(2*N));
end

hef3 = resample(hef3,3,4);
hef2 = resample(hef2,1,2);

h4=hef4/factech4; % K = 4
h3=hef3/factech3; % K = 3
h2=hef2/factech2; % K = 2

switch K
case 2
    h = h2;
case 3
    h = h3;
case 4
    h = h4;
end
end

```



```
function [] = matrix_gfdm(N,G)
%MATRIX_GFDM Funcion que genera la matriz de modulacion para GFDM (5G)
% Parametros de ENTRADA:
% - N: nº de subportadoras
% - G: nº de subsimbolos
K = G;

% Meyer RRC (Raiz Coseno Realzado, en tiempo)
a = 1; % Factor de roll-off
R = ((0:(N-1))' - N/2 - eps)/(a*N) + 1/2;

R(R<0) = 0;
R(R>1) = 1;

F = 1-R;
R = R.^4.*(35 - 84*R+70*R.^2-20*R.^3);
F = 1-R;
R = 1/2*(cos(F*pi)+1);
F = 1-R;
R = sqrt(R);
F = sqrt(F);
g = [F;zeros((K-2)*N,1);R];
g = g/sqrt(sum(g.^2));

% Distinto filtro en funcion de real/imag
gi = g;
gq = ifft(circshift(fft(gi), K/2));

n = 0:K*N-1; n=n';

hi = repmat([1,1i],[1 K/2]); % i
hq = repmat([1i,-1],[1 K/2]); % q
ci = zeros(K*N,K); % Guardamos todos los ci
cq = zeros(K*N,K); % Guardamos todos los cq

t = n(2:N)*n(2:N)';
tt = mod(t,N);
g1 = (tt(1:(N-2)/2,:));
g2 = (tt(N/2,:));

if rem(N,K) == 0 % par
    D = [g1;g2;fliplr(g1)];
else % impar
    D = [g1,fliplr(g1)];
end

W = exp(1j*2*pi/N*D.);
TW = zeros(N*K,N*K);
TW = repmat([ones(1,N);ones(N-1,1),W],[K K]);

for k=1:K % O-QAM
    ci(:,k) = hi(k)*circshift(gi,(k-1)*N);
    cq(:,k) = hq(k)*circshift(gq,(k-1)*N);
end

Ai = zeros(N*K,N*K);
Aq = zeros(N*K,N*K);
Ai = kron(ci,ones(1,N));
Aq = kron(cq,ones(1,N));

AAi = zeros(N*K,N*K);
AAq = zeros(N*K,N*K);
AAi = Ai.*TW;
AAq = Aq.*TW;

save(['AAi_' num2str(N) '_' num2str(G)], 'AAi', '-v7.3');
save(['AAq_' num2str(N) '_' num2str(G)], 'AAq', '-v7.3');
end
```

```
function [] = matrix_ufmc(N,B,L,a)
%MATRIX_UFMC Funcion que genera la matriz de modulacion para GFDM (5G)
% Parametros de ENTRADA:
%   - N: nº de subportadoras
%   - B: nº de subbandas
%   - L: longitud del filtro aplicado a nivel de subbanda
%   - a: atenuacion del lobulo secundario respecto del primario

% Parametros configurados segun proyecto 5GNOW
nPRB      = B;
FFTsize   = N;
lFIR      = L;
FilterPar_dB = a;
blockSize = FFTsize/nPRB;

% Dimensiones de la convolucion lineal
lMCsym     = FFTsize + lFIR - 1;
nUsedCarr  = nPRB*blockSize;
FFTsize    = nUsedCarr;

allocatedSubcarriers = [1 : nUsedCarr];

V = zeros(FFTsize,nUsedCarr);
for c = 1:nUsedCarr
    V(:,c) = exp(2*pi*1i*([1:FFTsize]-1)*c/FFTsize);
end

% Generacion del filtro Dolph-Chebyshev
f = chebwin(lFIR,FilterPar_dB);
F_all = [];
V_all = zeros(FFTsize*nPRB,nUsedCarr);

for iPRB = 1:nPRB

    blockShift = allocatedSubcarriers(1)-1;
    carrierind = blockShift + (blockSize+1)/2 + ...
        (iPRB-1)*blockSize;
    centerFshift = zeros(lFIR,1);
    for k = 1:lFIR
        centerFshift(k) = exp(2*pi*1i*(k-1)*carrierind/FFTsize);
    end

    % Emplazamos cada subbanda en su frecuencia central
    f1 = f.*centerFshift;

    Filterresponse_shifted{iPRB} = f1;

    F{iPRB} = toeplitz([f1;zeros(FFTsize-1,1)] , ...
        [f1(1),zeros(1,FFTsize-1)]);

    F_all = [F_all F{iPRB}];

    V_all( (1+(iPRB-1)*FFTsize):(iPRB*FFTsize), ...
        (1+(iPRB-1)*blockSize):(iPRB*blockSize)) = ...
        V(:,(1+(iPRB-1)*blockSize):(iPRB*blockSize));

end

T_all = F_all*V_all;
TimeDomainSig = T_all*ones(nUsedCarr,1);

% Normalizacion de la matriz de modulacion
A = T_all/sqrt(mean(abs(TimeDomainSig).^2)/nUsedCarr*FFTsize);

save(['A ' num2str(N) '_' num2str(NB) '_' num2str(L) '_' ...
    num2str(a)], 'A');
end
```

Anexo G

Hojas de Características

- Amplificador de Potencia (PA): ZHL-4240, MINI-CIRCUITS
- Diodo Láser (LD): DFB-EAM-1550-12, OPTILAB
- Diodo Fotodetector (PD): DR-125G-A, MITEQ
- Transistor HEMT (PA): CGH40006P, CREE

Coaxial Amplifier

ZHL-4240

50Ω Medium High Power 700 to 4200 MHz

Features

- wideband, 700-4200 MHz
- high IP3, +30 dBm typ.
- high gain, 40 dB min.
- medium high power, 28dBm min

Applications

- communication systems
- instrumentation
- satellite dist./GPS/PCS
- laboratory



CASE STYLE: U36
Connectors Model
SMA ZHL-4240

Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQ. (MHz)		GAIN (dB)		MAXIMUM POWER OUTPUT (dBm)		DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Max.		DC POWER	
	f _L	f _H	Min.	Max.	(1 dB Compr.) Min.	Input (no damage)	NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In	Out	Volt (V) Nom.	Current (A) Max.
ZHL-4240	700	4200	40	±1.5*	+28	-5	8.0	+38	2.5	2.5	15	0.90

* Measured at 25°C

Open load is not recommended, potentially can cause damage.
With no load derate max input power by 20 dB

Maximum Ratings

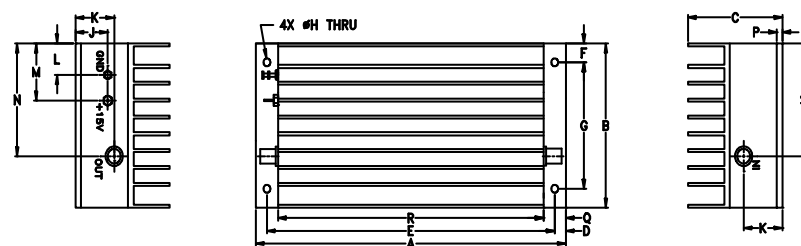
Operating Temperature -20°C to 65°C

Storage Temperature -55°C to 100°C

DC Voltage +20V Max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Outline Drawing



MOUNTING INFORMATION FOR MODELS WITHOUT HEATSINK

Outline Dimensions (inches)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	wt
7.00	3.25	2.13	.25	6.500	.38	2.500	.156	.73	.88	.63	1.13	2.23	.125	.50	6.00	2.23	grams
177.80	82.55	54.10	6.35	165.10	9.65	63.50	3.96	18.54	22.35	16.00	28.70	56.64	3.18	12.70	152.40	56.64	900

Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp



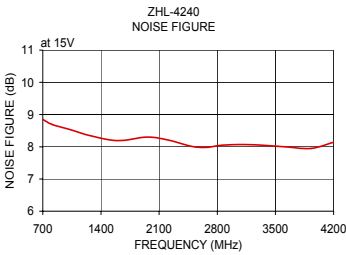
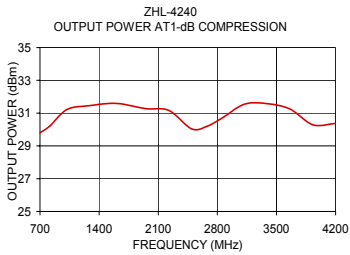
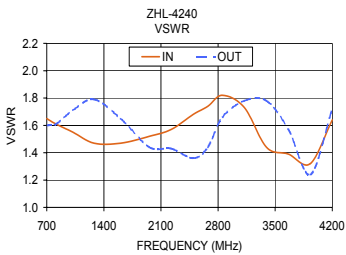
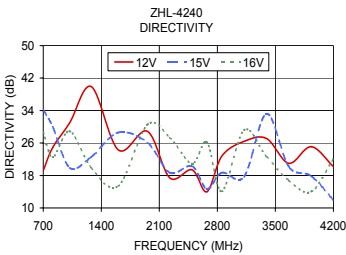
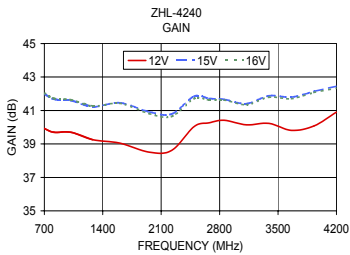
www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. A
M151107
ZHL-4240
151005
Page 1 of 2

Typical Performance Data/Curves

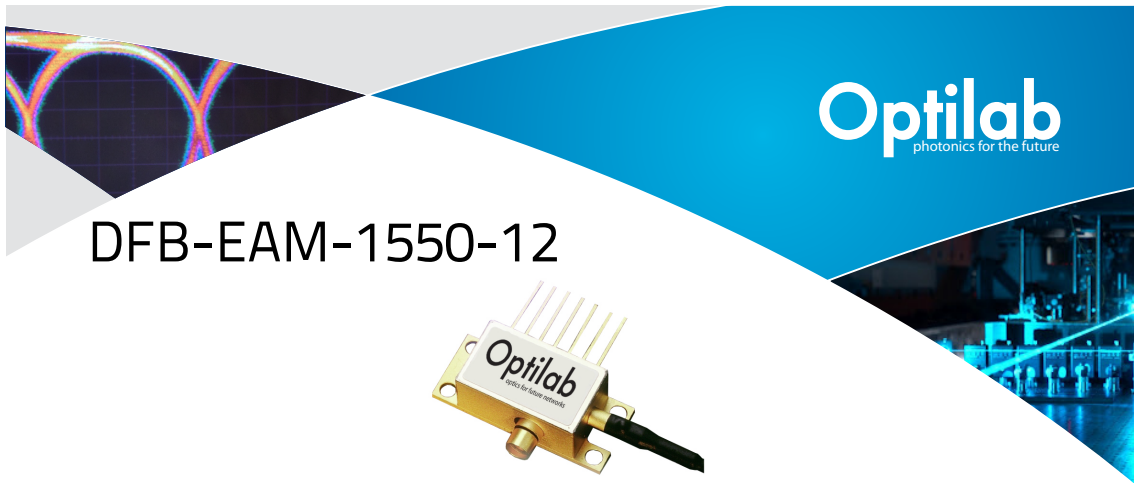
ZHL-4240

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)			DIRECTIVITY (dB)			VSWR (:1)		NOISE FIGURE (dB)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)
	12V	15V	16V	12V	15V	16V	IN	OUT	15V	15V
700.00	39.92	42.00	42.04	19.20	34.20	28.70	1.65	1.60	8.85	29.80
814.00	39.70	41.68	41.72	24.90	30.00	22.50	1.61	1.61	8.69	30.21
1020.00	39.70	41.60	41.64	31.00	19.90	28.90	1.55	1.71	8.54	31.22
1280.10	39.25	41.22	41.26	39.90	22.60	19.80	1.47	1.79	8.34	31.45
1605.20	39.05	41.46	41.43	24.30	28.60	15.40	1.47	1.65	8.19	31.59
1956.40	38.51	40.92	40.81	28.90	26.10	30.50	1.52	1.44	8.30	31.27
2225.60	38.61	40.79	40.64	17.40	18.70	27.30	1.57	1.43	8.20	31.16
2494.90	40.04	41.85	41.71	19.40	20.30	20.90	1.68	1.36	8.01	30.04
2674.40	40.26	41.72	41.63	14.00	14.70	26.20	1.74	1.44	7.98	30.19
2853.80	40.42	41.66	41.62	22.80	18.70	14.10	1.82	1.66	8.05	30.69
3123.10	40.14	41.41	41.35	26.40	17.70	29.20	1.73	1.78	8.07	31.55
3392.30	40.23	41.88	41.79	27.10	33.20	22.60	1.44	1.78	8.04	31.58
3661.50	39.81	41.80	41.70	21.00	20.20	16.80	1.39	1.57	7.99	31.25
3930.80	40.08	42.14	42.07	25.10	17.90	14.00	1.32	1.24	7.95	30.29
4200.00	40.90	42.45	42.34	20.20	11.90	22.10	1.64	1.72	8.14	30.37



Notes
A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuit's standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuit's website at www.minicircuits.com/MCStore/terms.jsp





DFB-EAM-1550-12

EAM DFB Laser Diode, 12 GHz, 5 mW

The Optilab DFB-EAM laser diode is a cost effective and compact laser solution for OC-192/STM-64 DWDM applications. Consisting of a DFB laser with an integrated electro-absorption modulator (EAM), this allows for modulation speeds of over 12 GHz / 10 Gb/s applications on one 7-pin butterfly package device. Including a thermoelectric cooler (TEC), temperature thermistor, optical isolator and a GPO RF connector, the DFB-EAM is available in ITU grid wavelengths upon request, contact Optilab for more information.

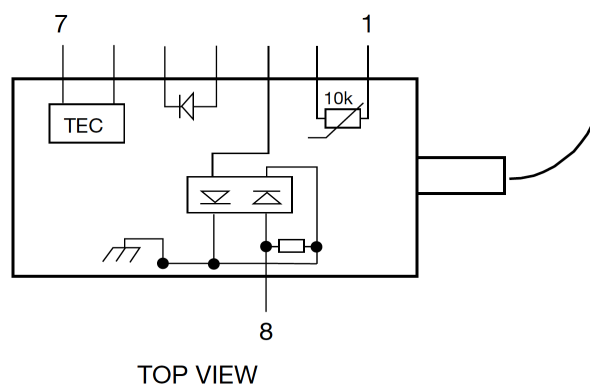
Features

- 1550 nm DFB + EAM Modulator
- Hermetic, 7 pin butterfly package
- Single-mode fiber pigtail
- 12 GHz typical bandwidth
- 5mW output power
- TEC Cooler + Thermistor

Applications

- DWDM SDH STM-64 LH
- DWDM SONET OC-192 LR

Functional Diagram



EAM DFB Laser Diode, 12 GHz, 5 mW

OPTIONS

DFB-EAM-1550-12

TECHNICAL INFO

For technical info and support:

sales@optilab.com

www.optilab.com

PHONE

Contact Optilab at:

1-888-553-3888 (toll-free)
1-602-343-1496 (direct, int'l)

Optilab, LLC
Phoenix, AZ, USA

WEB ORDER

To order this any many more products, please visit OEQuest.com and order online today.

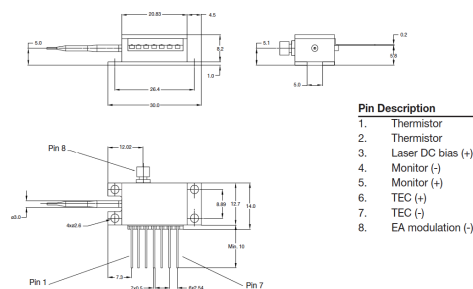
 **OEQuest.com**

Optilab Advantage

- Innovation
- Performance
- Quality
- Customization
- Warranty

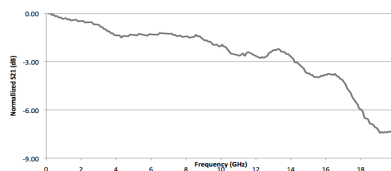
Optical Specifications	
Operating Wavelength Range	1530 nm to 1564 nm, ITU selectable
Output power	2mW min., 5mW typ.
Extinction ratio	10 dB min.
Dispersion penalty	1.5 dB max. @ 800 ps/nm disp.
Side mode suppr.ratio	35 dB min.
Optical isolation	30 dB min.
Operating current	50 mA min., 100 mA max.
Threshold current	25 mA max.
Forward voltage	2 V max.
Small signal modulation bandwidth	12 GHz min.
Rise/Fall time	40 ps max.
Monitor current	0.1 mA min., 1 mA max.
Monitor dark current	5 nA typ., 100 nA max.
Thermistor resistance	9.5 kΩ min., 10.5 kΩ max.
TEC Voltage	-2.5 V min., 2.5 V max.
TEC Current	-1.2 V min., 1.2 V max.
TEC Power	3 W max.
Mechanical Specifications	
Operating case temperature	0°C to +70°C
Storage temperature	-40 °C to +85°C
Optical Connector	LC/UPC Standard, FC/APC Optional
Fiber Type	SMF-28, 900 micron buffer
RF Connector	GPO

Mechanical Drawing



S21

Typical S21



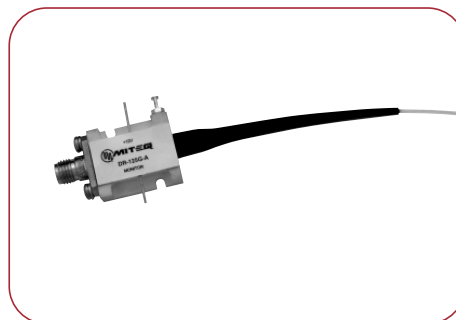
Optilab
photonics for the future

30 kHz - 12.5 GHz OPTICAL RECEIVER

MODEL: DR-125G-A

FEATURES

- 10.7 and 12.5 Gb/s
- Hermetic Kovar package
- Available as “drop-in”
- Single voltage supply
- Customized packages and electrical specifications available



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

PARAMETERS	CONDITION	UNITS	MIN.	TYP.	MAX.
Bandwidth	3 dB electrical		30 kHz		13 GHz
Photodiode responsivity		A/W	0.8	0.9	0.97
Transimpedance gain		Ohms	1780	2240	2820
Transimpedance gain (dB - Ω)		dB, ohms	65	67	69
Optical to electrical transfer gain (see Note 1)		V/W	1510	1900	2395
Dark current		nA		5	50
Sensitivity (see Note 2)	10.7 Gb/s 12.5 Gb/s	dBm dBm		-18 -17	
Group delay (see Note 3)		ps		100	200
RF output impedance		Ohms		50	
RF output VSWR			2:1		
Maximum output voltage		V, p-p	3.5	4.5	5
Logic sense	Inverting (non-inverting as option)				

NOTES:
1. Optical to electrical transfer gain measured as follows: Output V, p-p (in 50 ohm)/Input optical power (W, p-p).
2. NRZ, PRBS = $2^{31}-1$, B.E.R. = 10^{-10} .
3. Defined within the 3 dB optical to electrical bandwidth.

OPTICAL PERFORMANCE SPECIFICATIONS

PARAMETERS	CONDITION	UNITS	MIN.	TYP.	MAX.
Optic connector (all standards available)	FC/APC standard				
Fiber (core/cladding)	9/125 μ m single mode fiber (1 meter)				
Input wavelength		nm	1280		1580
Microwave input power*	Overload	dBm			+5
Optical return loss		dB	30		

* Maximum overload defined as the maximum optical input power while maintaining the Bit Error Rate (B.E.R.) of 10^{-10} or better.
Test conditions: NRZ, 12.5 Gb/s, PRBS = $2^{31}-1$, B.E.R. = 10^{-10} .

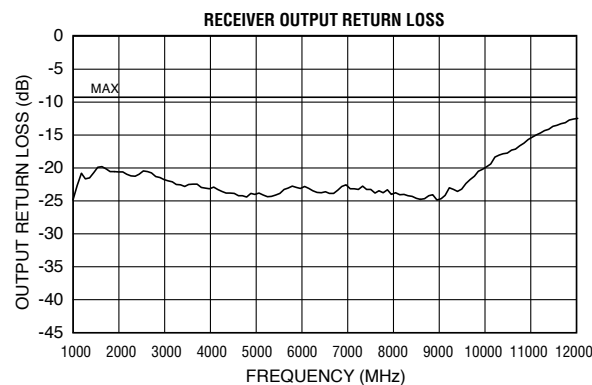
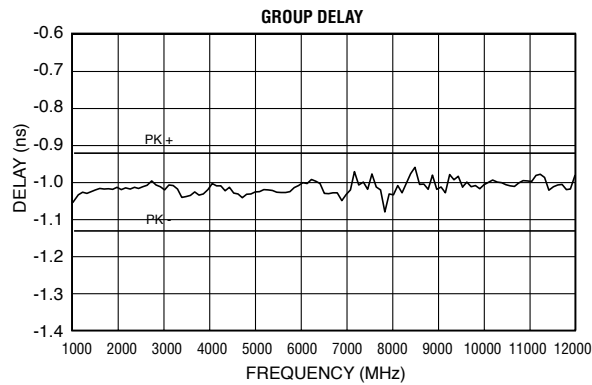
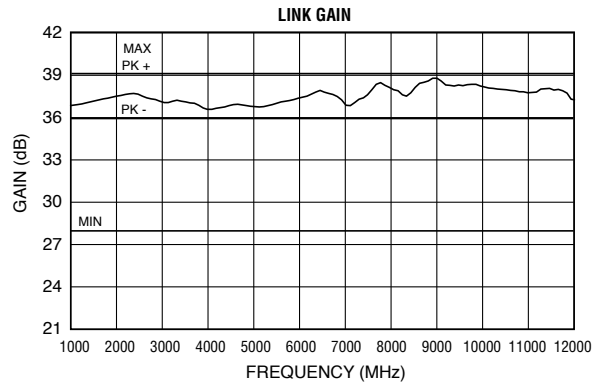
ORDERING INFORMATION

Receiver without monitor Part number: DR-125G-A
Receiver with monitor Part number: DR-125G-MV



100 Davids Drive, Hauppauge, NY 11788 • TEL: (631) 439-9220 • FAX: (631) 436-7430 • www.miteq.com

TYPICAL TEST DATA



GENERAL CONDITIONS

Voltage range +11 V to +16 V
 Current..... 230 mA typical to 275 mA maximum
 RF connectors SMA female standard
 Optional operation+12 VDC

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Operating temperature..... -5 to +70°C
 Storage temperature -40 to +85°C
 Humidity 95% relative humidity, noncondensing

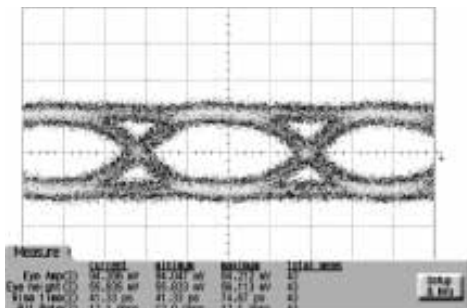
C40-1107-40



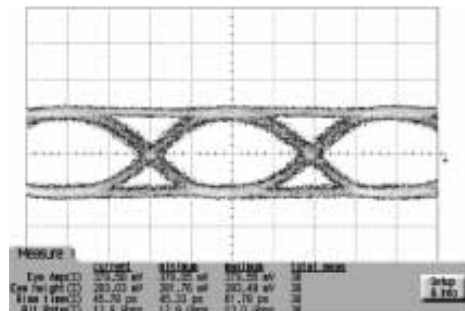
100 Davids Drive, Hauppauge, NY 11788 • TEL: (631) 439-9220 • FAX: (631) 436-7430 • www.miteq.com

MEASUREMENTS

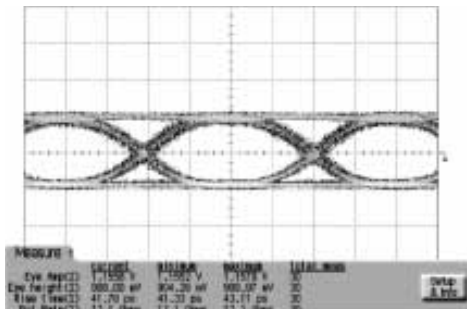
INPUT POWER -16 dBm



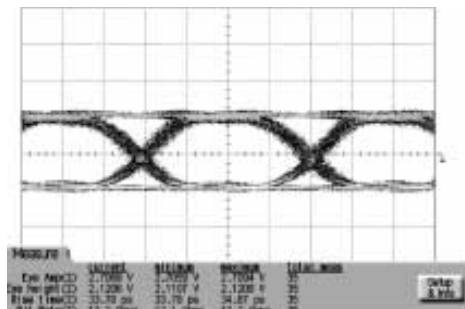
INPUT POWER -10 dBm



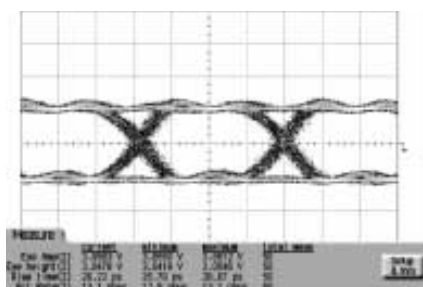
INPUT POWER -5 dBm



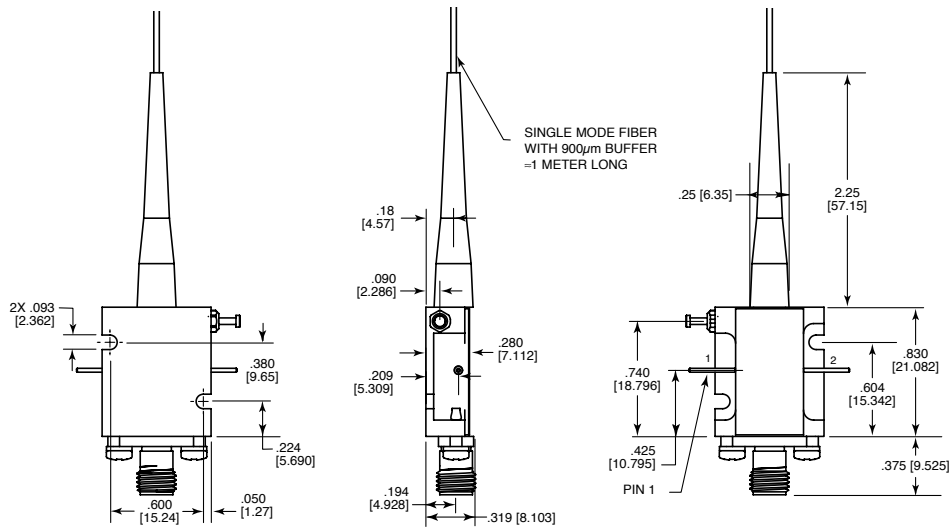
INPUT POWER 0 dBm



INPUT POWER +5 dBm



RECEIVER OUTLINE DRAWING



RECEIVER POWER SUPPLY

PIN	VOLTAGE	CURRENT (AMPS)	NOTES
1			PHOTOCURRENT MONITOR
2	+12	0.1	REFER TO "OPERATIONAL STATUS"

RECEIVER OPERATIONAL STATUS

PIN	DESCRIPTION	NORMAL VOLTAGE	NOTES
1	OPTICAL CARRIER DETECT	> 1.0 UP TO +8	0 VOLTS INDICATES NO CARRIER PRESENT. VOLTAGE INCREASES APPROXIMATELY 1.3 V/mW WITH DETECTED OPTICAL POWER.

RF CONNECTOR: SMA (FEMALE STANDARD)
OPTICAL CONNECTOR: FC/APC STANDARD (OTHER STANDARDS AVAILABLE)
OPTICAL FIBER: 9/125 SINGLE MODE

NOTE: DIMENSIONS SHOWN IN BRACKETS [] ARE IN MILLIMETERS.



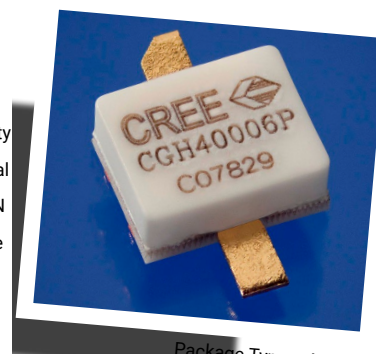
100 Davids Drive, Hauppauge, NY 11788 • TEL: (631) 439-9220 • FAX: (631) 436-7430 • www.miteq.com



CGH40006P

6 W, RF Power GaN HEMT

Cree's CGH40006P is an unmatched, gallium nitride (GaN) high electron mobility transistor (HEMT). The CGH40006P, operating from a 28 volt rail, offers a general purpose, broadband solution to a variety of RF and microwave applications. GaN HEMTs offer high efficiency, high gain and wide bandwidth capabilities making the CGH40006P ideal for linear and compressed amplifier circuits. The transistor is available in a solder-down, pill package.



Package Types: 440109
PN's: CGH40006P

FEATURES

- Up to 6 GHz Operation
- 13 dB Small Signal Gain at 2.0 GHz
- 11 dB Small Signal Gain at 6.0 GHz
- 8 W typical at $P_{IN} = 32$ dBm
- 65 % Efficiency at $P_{IN} = 32$ dBm
- 28 V Operation

APPLICATIONS

- 2-Way Private Radio
- Broadband Amplifiers
- Cellular Infrastructure
- Test Instrumentation
- Class A, AB, Linear amplifiers suitable for OFDM, W-CDMA, EDGE, CDMA waveforms





Absolute Maximum Ratings (not simultaneous) at 25°C Case Temperature

Parameter	Symbol	Rating	Units	Conditions
Drain-Source Voltage	V_{DS}	84	Volts	25°C
Gate-to-Source Voltage	V_{GS}	-10, +2	Volts	25°C
Storage Temperature	T_{STG}	-65, +150	°C	
Operating Junction Temperature	T_J	225	°C	
Maximum Forward Gate Current	I_{GMAX}	2.1	mA	25°C
Maximum Drain Current ¹	I_{DMAX}	0.75	A	25°C
Soldering Temperature ²	T_S	245	°C	
Thermal Resistance, Junction to Case ³	$R_{\theta JC}$	9.5	°C/W	85°C
Case Operating Temperature ³	T_C	-40, +150	°C	

Note:

¹ Current limit for long term, reliable operation

² Refer to the Application Note on soldering at www.cree.com/RF/Document-Library

³ Measured for the CGH40006P at $P_{DISS} = 8$ W.

Electrical Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$)

Characteristics	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
DC Characteristics¹						
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	-3.8	-3.0	-2.3	V_{DC}	$V_{DS} = 10$ V, $I_D = 2.1$ mA
Gate Quiescent Voltage	$V_{GS(Q)}$	–	-2.7	–	V_{DC}	$V_{DS} = 28$ V, $I_D = 100$ mA
Saturated Drain Current	I_{DS}	1.7	2.1	–	A	$V_{DS} = 6.0$ V, $V_{GS} = 2.0$ V
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{BR}	120	–	–	V_{DC}	$V_{GS} = -8$ V, $I_D = 2.1$ mA
RF Characteristics² ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $F_o = 2.0$ GHz unless otherwise noted)						
Small Signal Gain	G_{SS}	11.5	13	–	dB	$V_{DS} = 28$ V, $I_{DQ} = 100$ mA
Power Output at $P_{IN} = 32$ dBm	P_{OUT}	7.0	9	–	W	$V_{DS} = 28$ V, $I_{DQ} = 100$ mA
Drain Efficiency ³	η	53	65	–	%	$V_{DS} = 28$ V, $I_{DQ} = 100$ mA, $P_{IN} = 32$ dBm
Output Mismatch Stress	VSWR	–	–	10 : 1	Ψ	No damage at all phase angles, $V_{DS} = 28$ V, $I_{DQ} = 100$ mA, $P_{IN} = 32$ dBm
Dynamic Characteristics						
Input Capacitance	C_{GS}	–	3.0	–	pF	$V_{DS} = 28$ V, $V_{gs} = -8$ V, $f = 1$ MHz
Output Capacitance	C_{DS}	–	1.1	–	pF	$V_{DS} = 28$ V, $V_{gs} = -8$ V, $f = 1$ MHz
Feedback Capacitance	C_{GD}	–	0.1	–	pF	$V_{DS} = 28$ V, $V_{gs} = -8$ V, $f = 1$ MHz

Notes:

¹ Measured on wafer prior to packaging.

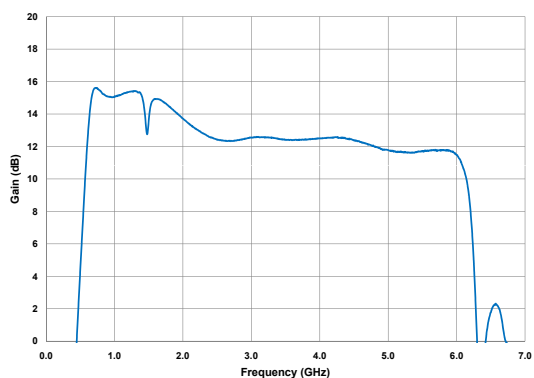
² Measured in CGH40006P-AMP.

³ Drain Efficiency = P_{OUT} / P_{DC}

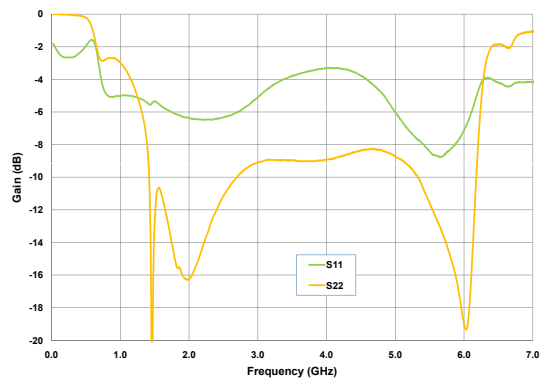


Typical Performance

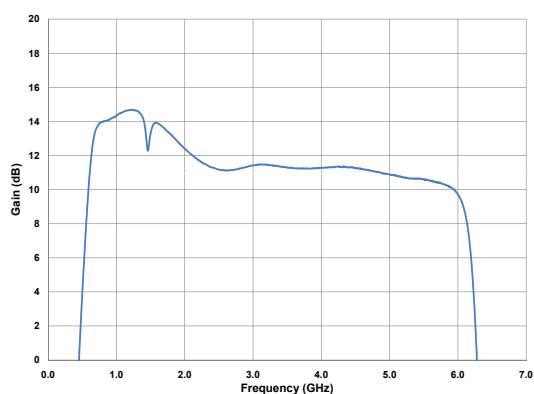
**Small Signal Gain vs Frequency at 28 V
of the CGH40006P in the CGH40006P-AMP**



**Input & Output Return Losses vs Frequency
28 V of the CGH40006P in the CGH40006P-AMP**



**Small Signal Gain vs Frequency at 20 V
CGH40006P in the CGH40006P-AMP**



**Input & Output Return Losses vs Frequency at of the
20 V of the CGH40006P in the CGH40006P-AMP**

