

Deteccción de parámetros y sincronización de OFDM sobre GNU Radio en sistemas multimodo

Eduardo Sánchez Muñoz, Jesús A. López-Fernández
uo245385@uniovi.es, jelofer@uniovi.es

Área de Teoría de la Señal y la Comunicación
Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón
Universidad de Oviedo
Campus de Gijón, 33203 Gijón, Asturias
<http://epigijon.uniovi.es/>

Resumen—An Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) system may have different operation modes, each one with its own symbol and cyclic prefix lengths. In many cases, the receiver needs to detect the operation mode based solely on the received OFDM signal, besides performing symbol and frame synchronization. An algorithm based on the detection of the cyclic prefix to identify the operation mode and perform symbol synchronization has been implemented with software radio. In addition, we suggest an algorithm for frame synchronization. Simulations are used to evaluate the performance of the system in the presence of white noise. Results show that the algorithm perform well, even in low-SNR scenarios. An improvement to the mode detection algorithm is also proposed and evaluated.

I. INTRODUCCIÓN

OFDM (Orthogonal Frequency-division Multiplexing) es el sistema multiportadora más utilizado en la actualidad [1]. Los sistemas multiportadora se basan en repartir el ancho de banda disponible entre un conjunto de señales de menor ancho de banda, denominadas subportadoras, cada una de las cuales se transmite sobre una frecuencia central distinta. Al transmitir múltiples señales con ancho de banda reducido, el periodo de símbolo aumenta, lo que permite que el sistema se adapte mejor a escenarios de propagación multitrayecto.

La implementación eficiente de OFDM se realiza habitualmente mediante una transformada rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) de N puntos, tanto en transmisión (FFT inversa o IFFT) como en recepción (FFT directa). N es precisamente el número de componentes o muestras con información asociadas a cada símbolo OFDM. Para mitigar los efectos del multitrayecto los símbolos OFDM incorporan una cabecera, denominada prefijo cíclico, que repite las últimas L componentes del símbolo al principio del mismo. De manera que cada símbolo transmitido tendrá una duración de $N + L$ muestras. Conviene notar que L es una fracción de N y, con el fin de evitar la interferencia entre símbolos y entre subportadoras, su valor ha de ser tal que el canal discreto equivalente sea de menor duración que L . Con el fin de adaptarse a distintos escenarios de comunicación, algunos sistemas de comunicación contemplan diferentes modos de funcionamiento, cada uno de los cuales lleva aparejados distintos valores de N y de L . En algunos sistemas, típicamente de transmisión punto a punto, ambos extremos de la comunicación llevan a cabo un proceso de negociación donde se establecen los parámetros que se van

a usar. En cambio, en los sistemas de radiodifusión, existe un transmisor que está transmitiendo de forma continua y varios receptores que pueden empezar a recibir en cualquier momento. Dada la naturaleza de estos sistemas, no es posible llevar a cabo una negociación previa y el receptor deberá ser capaz de determinar los parámetros usados por el transmisor usando únicamente la propia señal recibida.

El sistema Digital Radio Mondiale (DRM) [2] es un ejemplo donde el receptor debe ser capaz de determinar el modo de funcionamiento usado por el transmisor. Se trata de un estándar de radio digital diseñado para funcionar en las bandas de radio AM (onda larga, media y corta) y FM (VHF). Para la banda de AM, el estándar define 4 modos de funcionamiento [3], denominados modos A, B, C y D. Cada uno de estos modos usa una longitud de FFT y de prefijo cíclico distintas.

Además de identificar el modo de funcionamiento, el receptor también debe recuperar el sincronismo temporal de la señal. La sincronización temporal de la señal se puede dividir entre sincronización de símbolo y de trama. La sincronización de símbolo consiste en identificar el instante de comienzo de cada símbolo de la señal recibida. Esta sincronización es necesaria para determinar las ventanas temporales donde el receptor debe calcular la FFT para demodular la señal. La sincronización de trama consiste en identificar el primer símbolo de cada trama. Esto es necesario para que el receptor pueda interpretar correctamente la estructura de datos usada en el sistema de comunicaciones.

Este trabajo se centra en la implementación de algoritmos de identificación de modo de funcionamiento y de sincronización, tanto de símbolo como de trama, para un sistema OFDM similar al usado en el estándar DRM. Para la detección de modo, se ha implementado el algoritmo propuesto en [4]. Asimismo, se ha empleado la información que proporciona este algoritmo para realizar la sincronización de símbolo. Finalmente, se propone un algoritmo de sincronización de trama basado en correlación que, usando el conocimiento del modo de funcionamiento y la sincronización de símbolo, ofrece una estimación de cuál es el primer símbolo de la trama. La implementación de las distintas técnicas se ha realizado sobre GNU Radio, un entorno de desarrollo de radio definida por software (SDR – Software Defined Radio). Una ventaja importante del desarrollo sobre SDR consiste en que permite evaluar los sistemas desarrollados sobre un

escenario controlado (por ser las condiciones y el canal de transmisión simulados) al tiempo que conlleva una integración relativamente sencilla en una plataforma hardware de SDR.

La estructura de este artículo es la siguiente. En la sección II se hace una breve descripción teórica del algoritmo usado para detección de modo y sincronización de símbolo y del algoritmo propuesto e implementado para la sincronización de trama. En la sección III se explica cómo se han implementado dichos algoritmos sobre SDR. En la sección IV se muestran los resultados obtenidos y finalmente en la sección V se resumen una serie de conclusiones.

II. ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE MODO Y SINCRONIZACIÓN

A. Detección de modo y sincronización de símbolo

El algoritmo propuesto en [4] se basa en detectar la existencia de un prefijo cíclico de duración y separación determinadas, dependientes del modo de funcionamiento, en la señal OFDM recibida. Para ello, se obtiene, para cada modo de funcionamiento m (en el caso de DRM, $m = A, B, C, D$), la secuencia $d_m[n]$ calculada mediante el producto escalar ponderado entre la señal recibida, $r[k]$, adelantada n muestras y dicha señal adelantada $n - N_m$ mediante la siguiente expresión:

$$d_m[n] = \alpha_m \cdot \sum_{k=0}^{L_m-1} \omega_m[k] \cdot r[n - N_m + k] \cdot r^*[n + k], \quad (1)$$

donde α_m es un coeficiente definido para cada modo y que tiene el objetivo de normalizar las secuencias $d_m[n]$ para que sean comparables entre sí; además, $\omega_m[k]$ representa la secuencia de ponderación, que consiste en una ventana de duración L_m . El objetivo de esta ventana consiste en determinar el producto escalar entre versiones de la secuencia recibida en el intervalo de interés, cuya longitud es la del prefijo cíclico. N_m y L_m son las longitudes de la FFT y del prefijo cíclico, respectivamente, correspondientes al modo m .

La secuencia $d_m[n]$ presentará picos con periodo $N_m + L_m$ cuando $r[n]$ sea una señal OFDM con longitud de FFT N_m y prefijo cíclico L_m . Estos picos se producen por el solapamiento temporal entre los prefijos cíclicos contenidos en $r[n - N_m + k]$ y la últimas L_m componentes de cada símbolo contenido en $r[n + k]$.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento del algoritmo implementado en canales multitrayecto, en este trabajo se ha empleado la ventana $\omega_m[k]$ sugerida en [4], repetida aquí por claridad:

$$\omega_m[k] = \begin{cases} 2^{-6} \cdot k + (1 - 2^{-7} L_m), & \text{si } 0 \leq k < \frac{L_m}{2}; \\ 1, & \text{si } \frac{L_m}{2} \leq k < L_m. \end{cases} \quad (2)$$

Con el fin de incrementar la relación señal a ruido, en este trabajo se propone calcular una nueva secuencia, $d'_m[n]$, formada a partir de la superposición de K versiones retrasadas de la secuencia $d_m[n]$, según:

$$d'_m[n] = \sum_{i=0}^{K-1} d_m[n - i(N_m + L_m)]. \quad (3)$$

En esta nueva secuencia, se superponen K picos consecutivos de la secuencia $d_m[n]$. En el caso ideal, la superposición de

estos picos sería totalmente coherente frente a una suma no coherente del resto de la señal, lo que quiere decir que la relación señal a ruido podría llegar a mejorar en un factor K .

Finalmente, la detección de las posiciones de los picos observados en la secuencia $d'_m[n]$ permite identificar el comienzo de cada símbolo, por lo que la utilización del algoritmo de detección de modo para conseguir la sincronización de símbolo es inmediata.

B. Sincronización de trama

El primer símbolo de cada trama cuenta con un conjunto de subportadoras piloto, cuyo valor no depende de la información transmitida y es conocido tanto por el transmisor como por el receptor. De ahora en adelante, se supondrá que hay Q subportadoras piloto y se notará como I_i y X_i (con $0 \leq i < Q$) a los índices y valores, respectivamente, de las subportadoras piloto. Asimismo, se considerará que el modo de funcionamiento (A, B, C o D) ya ha sido detectado, lo que permite obviar el subíndice en la notación de la longitud de la FFT, N , y del prefijo cíclico, L .

Para determinar el comienzo de la trama, el receptor calcula la correlación entre la secuencia transmitida correspondiente al primer símbolo (símbolo piloto) y cada uno de los símbolos recibidos desplazados al origen. Esta correlación se calcula sólo para L muestras. Así, la correlación mencionada correspondiente al símbolo recibido l -ésimo viene dada por:

$$c_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} r_l[k] \cdot x^*[k - n], \quad (4)$$

con $0 \leq n < L$ y $r_l[n]$ representa la secuencia observada correspondiente al símbolo l -ésimo desplazado al origen para lo cual es necesario realizar a priori la sincronización de símbolo. Además, $x[k]$ es la transformada de Fourier discreta inversa (IDFT – Inverse Discrete Fourier Transform) del símbolo piloto (con los valores de las subportadoras piloto y las demás apagadas):

$$x[n] = \sum_{i=0}^{Q-1} X_i \cdot e^{j2\pi \frac{I_i}{N} n}. \quad (5)$$

Asimismo, mediante manipulaciones algebraicas es posible obtener dicha correlación a partir de la IDFT del producto de las secuencias en el dominio transformado, i.e.:

$$c_l[n] = \sum_{i=0}^{Q-1} R_l[I_i] \cdot X_i^* \cdot e^{j2\pi \frac{I_i}{N} n}, \quad (6)$$

siendo $R_l[I_i]$ la DFT de la secuencia recibida correspondiente al símbolo l -ésimo en los índices correspondientes a las subportadoras piloto.

Para cada símbolo l , se busca el valor máximo del módulo de la secuencia $c_l[n]$. Considerando que cada trama se compone de M_m símbolos (para el modo m), el primer símbolo de cada trama, l_0 , será aquel que, en cada grupo de M_m símbolos contiguos, lleve asociado el mayor máximo, es decir:

$$l_0 = \arg \max_l \left\{ \max_n \{|c_l[n]|\} \right\} \quad (7)$$

III. IMPLEMENTACIÓN

Para implementar el algoritmo descrito en el apartado anterior, se ha usado GNU Radio, un entorno de desarrollo de radio definida por software (SDR) [5] que permite la interconexión de bloques de procesamiento digital de señal para desarrollar sistemas de comunicaciones.

La implementación desarrollada consiste en varios bloques programados en C++ que se describen a continuación y que se conectan en el orden descrito.

- “OFDM Detector”: este bloque toma como entrada la envolvente compleja de la señal recibida, $r[k]$. Para cada modo de funcionamiento m , calcula la expresión (3) y busca máximos en ventanas de longitud $N_m + L_m$. A su salida, genera una copia de la señal de entrada, etiquetada usando la función “Stream Tags” de GNU Radio [6]. Estas etiquetas indican la posición de los máximos de las secuencias $d'_m[n]$, el modo de funcionamiento con el que se corresponden y el valor de dichos máximos.
- “OFDM Symbol Sync”: toma como entrada $r[k]$ con las etiquetas generadas por “OFDM Detector”. Empleando las amplitudes de los máximos proporcionadas por las etiquetas, identifica el modo de funcionamiento. Usando las posiciones de los máximos correspondientes al modo detectado, extrae ventanas de N muestras (longitud del símbolo -descartando el prefijo cíclico- asociado al modo detectado) de $r[k]$ sobre las que el receptor calculará la FFT para realizar la demodulación OFDM. A su salida, este bloque proporciona las muestras de estas ventanas temporales. Cada una de estas ventanas están etiquetadas con el modo de funcionamiento detectado y su longitud N . La etiqueta de longitud permite interpretar el flujo de muestras como una secuencia de paquetes de N muestras usando la función “Tagged Streams” de GNU Radio [7].
- “OFDM Demod”: toma como entrada la salida del bloque “OFDM Symbol Sync”, es decir la secuencia de símbolos cuyas ventanas temporales ya están identificadas. Calcula la FFT de N puntos correspondiente a cada uno de los símbolos recibidos. A la salida, se proporciona el resultado de cada FFT etiquetada con el modo de funcionamiento correspondiente.
- “OFDM Frame Sync”: toma como entrada la FFT de cada símbolo recibido, junto con las etiquetas indicando el modo de funcionamiento. Usando el método descrito en la sección II-B, identifica el primer símbolo de cada trama. Dado que este bloque recibe la FFT de cada símbolo, se usa (6) para calcular las correlaciones. Este bloque copia su entrada a la salida, etiquetando los símbolos identificados como comienzo de trama. Dado que las tramas tienen un número fijo de símbolos M_m (para el modo de funcionamiento m), la sincronización se considerará correcta solo si el comienzo de cada trama se identifica cada M_m símbolos.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La implementación software desarrollada se ha probado bajo cierto escenario de comunicaciones que emplea los parámetros del sistema DRM. El estándar DRM define la longitud de símbolo y prefijo cíclico en tiempo continuo [3].

TABLA I
MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DRM EN LA BANDA AM

Modo (m)	N_m	L_m	Simb./trama (M_m)	α_m
A	288	32	15	1.5
B	256	64	15	1.2
C	176	64	20	1.2
D	112	88	24	1

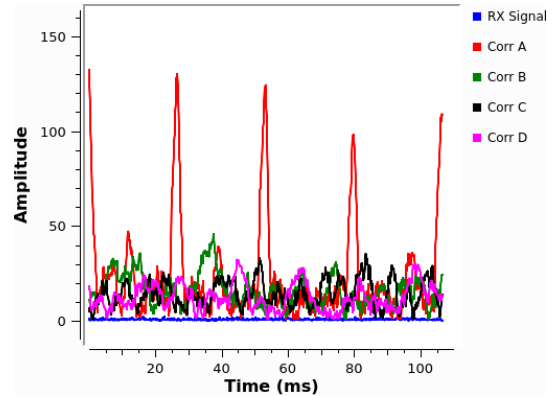


Fig. 1. Representación en tiempo continuo de las secuencias $d'_m[n]$ cuando se transmite el modo A, con una relación señal a ruido de 10 dB y usando $K = 3$. La notación “Corr m ” equivale a $d'_m[n]$.

En la Tabla I se muestran estos parámetros, en la banda AM, en tiempo discreto para una tasa de muestreo de 12 kHz. Para la sincronización de trama, también se usan las mismas subportadoras piloto definidas en el estándar de DRM.

Además, el estándar también define seis posibles anchos de banda de funcionamiento, de 4.5 kHz, 5 kHz, 9 kHz, 10 kHz, 18 kHz y 20 kHz. Para este trabajo se ha considerado siempre un ancho de banda de 10 kHz.

En [4] se propone un rango de valores de α_m para cada modo. En el presente artículo se han usado los valores mostrados en la Tabla I y que se encuentran dentro de los intervalos propuestos en [4]. El motivo de emplear estos valores en particular es para que sean aproximadamente inversamente proporcionales a L lo que supone una normalización de la ecuación (1) que posibilita una comparación más justa entre las secuencias $d_m[n]$ (y también $d'_m[n]$), evitando que los modos con mayor longitud de símbolo se vean favorecidos en la detección de modo.

Las simulaciones se han realizado en canal gaussiano, donde la única perturbación que afecta a la señal es la adición de ruido blanco. En la Fig. 1 se muestra la representación en tiempo continuo de las secuencias $d'_m[n]$ para cada modo de funcionamiento, cuando el transmisor usa el modo A. La relación señal a ruido en este caso es de 10 dB y el factor de solapamiento de picos es $K = 3$. Se observa que aparecen picos periódicos bien definidos para $d'_A[n]$, mientras que las secuencias correspondientes a los otros modos presentan máximos y periodicidades mucho menos acentuadas.

Para evaluar el rendimiento del sistema, se calcula la proporción de tramas que se sincronizan correctamente en función de la relación señal a ruido. Se considera que una trama está sincronizada correctamente si a lo largo de la misma la detección de modo y la sincronización de símbolo funciona correctamente y el primer símbolo es identificado

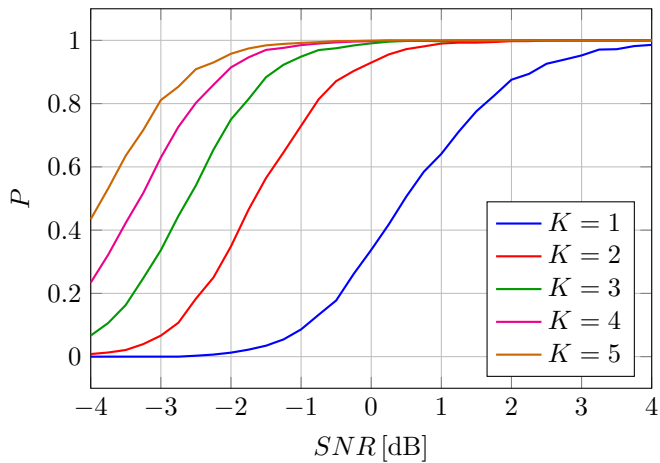


Fig. 2. Proporción de tramas sincronizadas correctamente en función de la relación señal a ruido y para diferentes valores de K con $m = A$.

correctamente. En la Fig. 2 se muestra en tanto por uno la tasa tramas sincronizadas correctamente al variar el factor de solapamiento de picos (K) cuando se transmite con el modo de funcionamiento A. Tal y como se observa en la figura, a medida que aumenta el factor de solapamiento de picos, mejora la tasa de detección. Esta mejora se acerca tanto más al máximo teórico indicado en la sección II-A cuanto menor sea el valor de K . Así por ejemplo, tomando como referencia $K = 1$, el ahorro de SNR sería: para $K = 2$ es de algo más de 2 dB (frente a 3 dB teóricos), para $K = 3$ de unos 3 dB (frente a 4.8 dB teóricos), y para $K = 4$ no llegaría a 4 dB (frente a 6 dB teóricos). Dado que el retardo en las decisiones es proporcional al valor de K , la elección de K supone un claro compromiso entre retardo y detección correcta del modo de funcionamiento. El uso de valores muy altos de K (mayores que 5) no parece compensar porque el ahorro energético es pequeño en relación al incremento en el retardo en la toma de decisiones.

En la Fig. 3 se muestra la proporción de tramas sincronizadas correctamente para los cuatro modos de funcionamiento cuando se usa $K = 3$. Para este caso, también se incluyen resultados en canal multitrayecto invariante en el tiempo, cuya respuesta en tiempo discreto viene dada por:

$$h_c[n] = \delta[n] + 0.5\delta[n - 12]. \quad (8)$$

En el caso de canal gaussiano, se puede observar que a partir de 0 dB se alcanza prácticamente una probabilidad de detección igual a 1 para los cuatro modos. Por debajo de esa relación señal a ruido, se observa que el modo con mejor funcionamiento es el D, seguido del C, el B y el A. Estas diferencias son debidas a la variación de L_m y de N_m . La longitud de la ventana del producto escalar calculado en (1) es igual a L_m , por lo que, a mayor duración del prefijo cíclico, mayor robustez frente al ruido. Además, los símbolos de menor duración conllevan una menor probabilidad de sincronización incorrecta, dado que se reduce la probabilidad de identificar un comienzo de símbolo erróneo. Esto último explica las diferencias observadas entre los modos B y C, con igual longitud de prefijo cíclico, pero en el que C lleva asociado un período de símbolo menor. En el caso de canal multitrayecto, se observa un deterioro del rendimiento, aunque

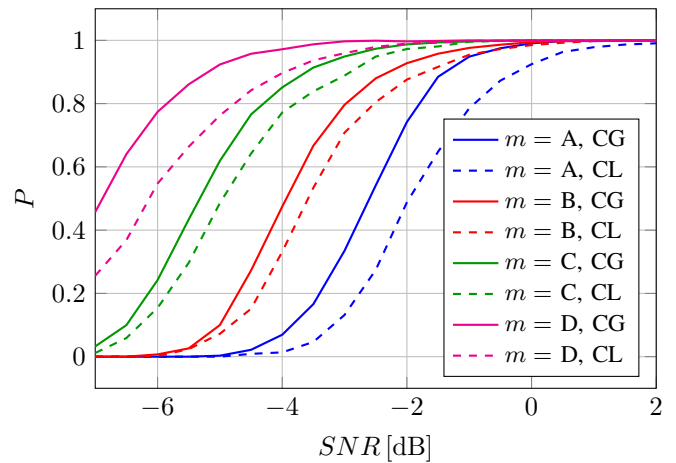


Fig. 3. Proporción de tramas sincronizadas correctamente en función de la relación señal a ruido para $K = 3$. Los resultados notados con "CG" son en canal gaussiano, mientras que los notados con "CL" emplean $h_c[n]$ de (8).

se siguen obteniendo buenos resultados por encima de 2 dB.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha implementado el algoritmo de detección de modo y sincronización de símbolo propuesto en [4]. Se ha comprobado que este algoritmo se puede mejorar mediante la suma coherente de picos. También se ha propuesto e implementado un algoritmo de sincronización de trama. En base a los resultados, se puede observar que la combinación de ambos algoritmos permite la correcta detección de modo y sincronización con relaciones señal a ruido cercanas a 0 dB. También se ha visto que los modos con mayor longitud de prefijo cíclico ofrecen un mejor rendimiento, especialmente para bajas relaciones señal a ruido.

En el caso de canal multitrayecto, también se han obtenido resultados prometedores. Como posible línea de trabajo futuro, se plantea la posibilidad de realizar un estudio más detallado del rendimiento en este tipo de canales, donde también se investigue qué combinaciones de valores de α_m y $\omega_m[k]$ dan lugar a mejores resultados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el proyecto TEC2017-86619 (ARTEINE) y por el Gobierno del Principado de Asturias/FEDER mediante el proyecto GRUPIN-IDI/2018/000191.

REFERENCIAS

- [1] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li and G. Ye Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.
- [2] Digital Radio Mondiale, <https://www.drm.org/>. [Accessed May 2020]
- [3] "Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification," ETSI ES 201 980 V4.1.2, April 2017.
- [4] L. Zeng, P. Zhang, S. Xu and H. Yang, "Robustness Mode Detection Algorithm in the DRM System," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 54, no. 4, pp. 792-798, December 2008.
- [5] "About GNU Radio," <https://www.gnuradio.org/about/>. [Accessed May 2020]
- [6] "Stream Tags," GNU Radio website, https://wiki.gnuradio.org/index.php/Stream_Tags. [Accessed May 2020]
- [7] "Tagged Stream Blocks," GNU Radio website, https://wiki.gnuradio.org/index.php/Tagged_Stream_Blocks. [Accessed May 2020]